

OBRAS SUBTERRÂNEAS NOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS EM PORTUGAL

Underground works in Portuguese hydropower schemes

Celso Lima^{a,b}, Carlos Esteves^a, Manuel Alberto Oliveira^a, Maria Eugénia Resende^a, Nadir Plasencia^a

^a EDP Gestão da Produção de Energia, Portugal

^b aposentado

RESUMO – As obras subterrâneas encontram-se associadas aos aproveitamentos hidroelétricos nos seus elementos principais: na barragem, contribuindo na satisfação das exigências de comportamento estrutural e hidráulico-operacional, e na central e circuito hidráulico, como elementos fundamentais do sistema hidráulico que possibilita a produção de energia. Neste artigo, são focadas obras subterrâneas realizadas, ao longo de um século, nos grandes aproveitamentos hidroelétricos de Portugal, dando-se destaque às obras consideradas mais relevantes pelo seu layout ou pelas suas características específicas. Nas obras mais recentes, é dada relevância a aspetos relacionados com análises numéricas, segurança, monitorização estrutural e ambiental, estratégias e métodos construtivos.

ABSTRACT – Underground works are associated with hydroelectric projects in their main components: in the dam, satisfying the hydraulic-operational requirements, and in the powerhouse and hydraulic circuit, as fundamental elements of the hydraulic system that enables the production of energy. This article focuses on underground works carried out, over a century, in the major Portuguese hydroelectric plants, with emphasis on the works considered most relevant due to their layout or their specific characteristics. In the most recent works, relevance is given to aspects related to numerical analysis, safety, structural and environmental monitoring, constructive strategies and methods.

Palavras Chave – obras subterrâneas, centrais hidroelétricas.

Keywords – underground works, hydro-powerplants.

1 – INTRODUÇÃO

As características fisiográficas das bacias hidrográficas, com particular destaque para as condições hidrológicas, hidráulicas, topográficas e geológico-geotécnicas, salvaguardando a sustentabilidade ambiental e o interesse económico, têm uma influência fundamental na conceção dos aproveitamentos hidroelétricos e no conseqüente recurso a estruturas subterrâneas.

Pretende-se neste documento registar a importância das obras subterrâneas nos aproveitamentos hidroelétricos construídos em Portugal, num contexto histórico iniciado nos primórdios do século

E-mails: celsommlima@gmail.com (C. Lima), carlos.esteves@edp.com (C. Esteves), manuelalberto.oliveira@edp.com, mariaeugenia.resende@edp.com (M. Resende), nadir.plasencia@edp.com (N. Plasencia)

XX, por entidades cujas realizações vieram a ser integradas na EDP aquando da nacionalização do setor elétrico em 1975 e, posteriormente, as realizadas por esta empresa.

Visando tal objetivo, no segundo capítulo, são elencados os aproveitamentos hidroelétricos realizados ao longo dos anos, considerando apenas aqueles cuja potência instalada é de 10 MW ou superior.

No terceiro capítulo, são apresentados exemplos de obras subterrâneas diretamente associadas às barragens.

No quarto capítulo, focam-se as obras dos aproveitamentos hidroelétricos cujo layout, estabelecido em função do tipo de central e do circuito hidráulico, incorpora importantes e diversificadas obras. Em função de tais layouts, optou-se, neste último capítulo, por uma abordagem em que os aproveitamentos hidroelétricos são agrupados em três itens correspondentes aos seguintes tipos de situações definidos em função do posicionamento da central: na margem - em que as escavações para a central e restituição são a céu aberto -, em poço, e em caverna, estes implicando escavações subterrâneas para a central e circuito hidráulico. Nos aproveitamentos com central em caverna, distinguem-se as situações em que os circuitos hidráulicos são curtos, sem necessidade de chaminé de equilíbrio, e com circuitos hidráulicos longos. Nestes últimos, foram por sua vez consideradas as situações dos circuitos hidráulicos com adução curta e restituição longa com chaminé de equilíbrio, com adução longa dotada de chaminé de equilíbrio e restituição sem chaminé, e, por último, circuitos em que a adução e a restituição são longas, ambas com chaminé de equilíbrio.

2 – ENQUADRAMENTO HISTÓRICO DOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS REALIZADOS EM PORTUGAL

A produção de energia elétrica a partir da força motriz da água iniciou-se em Portugal na última década do século XIX, sendo inicialmente o seu desenvolvimento ditado pela necessidade de satisfazer consumos locais, nomeadamente para alimentar pequenas instalações de iluminação pública e oficinas de moagens, fiação e tecelagem e, logo a seguir, fábricas de têxteis e lanifícios (Madureira e Baptista, 2002).

Promovido pela empresa Eléctrica del Lima, o aproveitamento hidroelétrico do Lindoso, no rio Lima, *considerando que o valor da potência instalada de 8750 kVA era muito respeitável para qualquer país europeu naquela época* (EDP, 1993), é tido como o primeiro grande aproveitamento hidroelétrico construído em Portugal e também o primeiro que no layout incorpora obras subterrâneas de relevo. Estas respeitam à adução da água à central que incluiu a execução dum canal com 6781 m de extensão, entre a barragem e um grande reservatório de armazenamento, dos quais 4311 m são em túnel com 18,2 m² de secção, escavado numa formação granítica de boa qualidade.

As obras deste aproveitamento foram iniciadas em 1908. Para além das numerosas dificuldades técnicas inerentes a um trabalho deste tipo realizado naquela época, outras houve, de ordem política (a implantação da República em 1910 e a Grande Guerra 1914/18), que levaram a que a conclusão do canal de derivação, considerado uma extraordinária obra de Engenharia, tenha só ocorrido em 1921 e a entrada em serviço da central no ano de 1922.

Nos anos de 1923 e 1924 procedeu-se à sobrelevação da barragem, da altura inicial de 5 m para uma altura de 22,5 m, da qual resultou uma albufeira com a capacidade de 750 000 m³. O crescente aumento dos consumos obrigou a sucessivos trabalhos de remodelação e ampliação da central, das linhas e do próprio canal, cuja capacidade de transporte foi elevada para 30 m³/s. A central, inicialmente com uma potência instalada de 7,5 MW, viu este valor incrementado em 1924 (7,5 MW + 7,5 MW). Posteriormente, procedeu-se ainda ao reforço da central com mais 15 MW em 1933 e mais 15 MW em 1945.

Nas décadas subsequentes, foram sendo construídos outros aproveitamentos hidroelétricos integrando túneis de pequeno diâmetro, predominantemente sem revestimento, e destinados a adução e derivação entre bacias hidrográficas com escoamento em superfície livre.

Pela sua relevância, destaca-se, na década de 40, o aproveitamento hidroelétrico de Santa Luzia, promovido pela Companhia Eléctrica das Beiras, cuja central, construída na margem esquerda do rio Zêzere no local de Esteiro, entrou em serviço no ano de 1943. Esta central, com uma potência instalada de 23,2 MW, é alimentada a partir da albufeira da barragem de Santa Luzia (Figura 1) por um circuito hidráulico, com água em pressão, que incorpora um troço de túnel, revestido com betão armado, seguido de conduta forçada (Hidrocenel, 1995). A barragem, projetada por A. Coyne, foi implantada numa garganta do rio Unhais, inserida numa faixa quartzítica, e recebe as aflúências da bacia hidrográfica própria com a área de 50 km².

Com vista a incrementar as aflúências da albufeira, foi realizado um conjunto de trabalhos que permite a derivação, para aquela, das águas coletadas numa área de 45 km² da bacia hidrográfica superior do rio Ceira, afluente do Mondego. Tais trabalhos, iniciados em 1939, incluíram a realização de obras subterrâneas e a materialização de quatro bacias de receção em linhas de água, a principal bacia decorrente da construção da barragem Alto Ceira (concluída em 1949 e substituída em 2014 por uma nova barragem) e as restantes criadas pelos açudes construídos nas ribeiras de Castanheira, do Tojo e do Ceiroco.

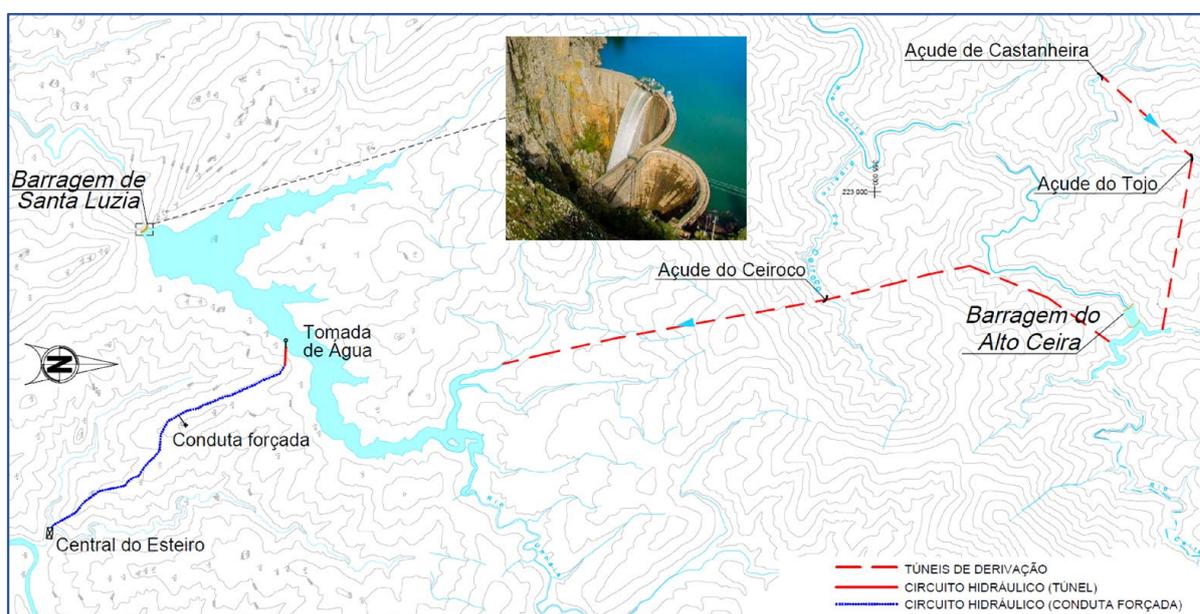


Fig. 1 – Barragem e albufeira de Santa Luzia e obras de derivação da bacia do rio Ceira.

A condução da água a partir das bacias de receção é assegurada, na margem direita do Ceira, por dois túneis com 7,4 m² de secção: o primeiro, com 1327 m, liga o açude da Castanheira ao açude do Tojo e o segundo, com 1930 m, liga este último à albufeira do Alto Ceira. Por sua vez, a água armazenada na albufeira do Alto Ceira é conduzida por gravidade para a albufeira de Santa Luzia através de túnel, com 11 m² de secção e extensão total de 6945 m, cuja continuidade é interrompida, sensivelmente a meio do trajeto, para receber as aflúências da bacia do Ceiroco.

A crescente necessidade de aproveitar a energia da água dos rios para a produção hidroelétrica, como meio para atingir a industrialização, eletrificação e desenvolvimento do país, foi ganhando força na década de 30 e ter-se-á começado a concretizar a partir de meados da década de 40 com a publicação da Lei nº 2002, de dezembro de 1944, que estabelece como prioritária a produção de energia elétrica com origem hidráulica e, subsequentemente, define a política respeitante à execução de novos aproveitamentos hidroelétricos.

Um primeiro passo dessa política foi a criação de empresas que construíssem e explorassem os recursos hidráulicos dos rios Cávado - Rabagão (em conjunto) e Zêzere. Em outubro de 1945, são então constituídas as empresas Hidro-Eléctrica do Cávado (HICA) e Hidro-Eléctrica do Zêzere

(HEZ), às quais são atribuídas concessões naqueles rios. Estas dão início à construção dos dois primeiros grandes aproveitamentos hidroelétricos: o de Castelo de Bode no rio Zêzere (Figura 2), com 159 MW de potência instalada, e o de Venda Nova no rio Rabagão, com 90 MW, ambos inaugurados em 1951 (EDP, 2001). Neste mesmo ano são ainda inaugurados os aproveitamentos de Belver no rio Tejo, com 32 MW, e o de Pracana no rio Ocreza, com 16 MW, que terão sido os últimos realizados pela Hidro-Eléctrica do Alto Alentejo (HEAA)¹ (Figueira, 2012).

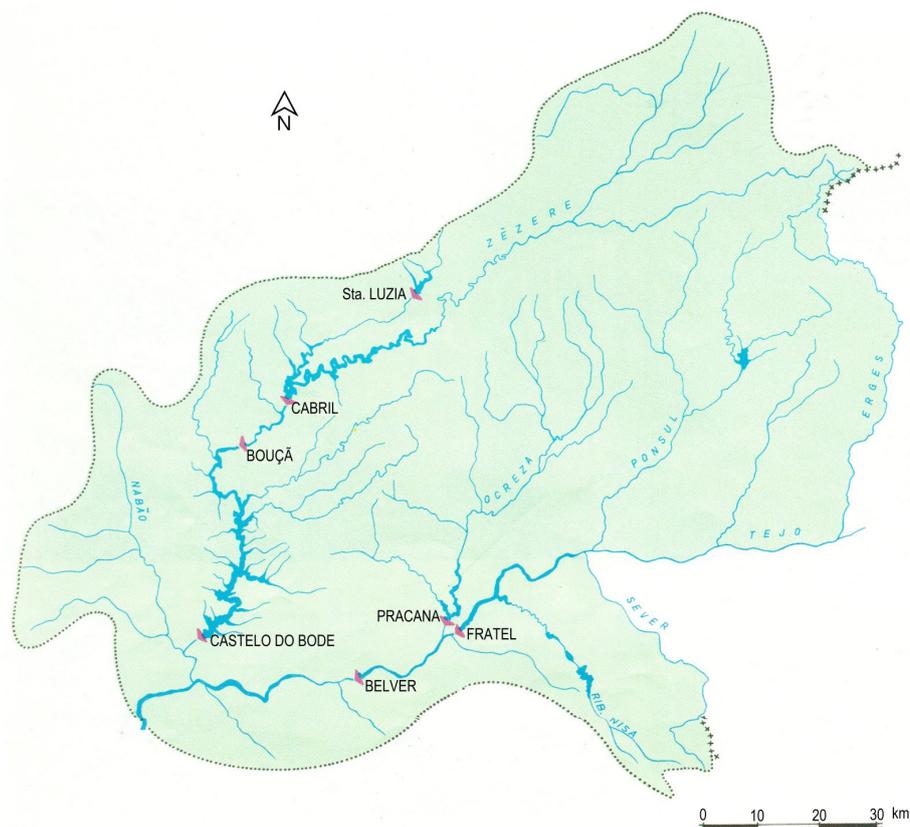


Fig. 2 – Bacia hidrográfica e aproveitamentos do Zêzere.

Alguns anos depois, em julho de 1953, é constituída a Hidro-Eléctrica do Douro (HED), tendo *por objeto a exploração de concessões de utilização das águas da bacia hidrográfica do rio Douro, nomeadamente as respeitantes à hidroelectricidade, podendo ainda utilizar outras concessões que lhe venham a ser atribuídas...* (Diário do Governo nº 169, III Série, de 1953/07/21).

Na bacia do Zêzere, para além de Castelo do Bode, a HEZ viria a realizar mais dois aproveitamentos: o de Cabril (108 MW), com entrada em serviço em 1954, e o de Bouçã (44 MW), cuja central entrou em serviço em 1955. Um outro aproveitamento, com concessão atribuída para implantação no troço do rio compreendido entre Cambas e a confluência do Zêzere com o Tejo (Diário do Governo de 27/12/1945), foi, entretanto, suspenso (Dec. Lei nº 39545 de 1954/02/23) devido ao seu reduzido interesse económico.

Nas bacias dos rios Cávado e Rabagão (Figura 3), a HICA inaugura os aproveitamentos de Salomonde (42 MW) em 1953, Caniçada (62 MW) em 1955 e Paradela (54 MW) em 1956. Entretanto, estando já em construção o aproveitamento de Paradela, o último dos escalões concedidos à HICA, esta, na sequência de estudos desenvolvidos das cabeceiras daqueles rios,

¹ HEAA - empresa constituída em 1925, responsável pela construção e exploração dos aproveitamentos da ribeira de Nisa, designadamente as centrais de Póvoa, Bruceira e Velada, cuja produção de energia teve início em 1927, 1928 e 1935, respetivamente.

concluiu pelo interesse da realização de novo aproveitamento com uma grande albufeira criada pela barragem do Alto Rabagão, para onde seriam derivadas as águas do Alto Cávado. Tal aproveitamento viu as obras dos diferentes elementos começarem em 1960 (abertura do túnel de derivação Cávado-Rabagão e escavações subterrâneas do poço de acesso à caverna da central) e a central, com uma potência instalada de 68 MW, entrar em serviço em 1964.

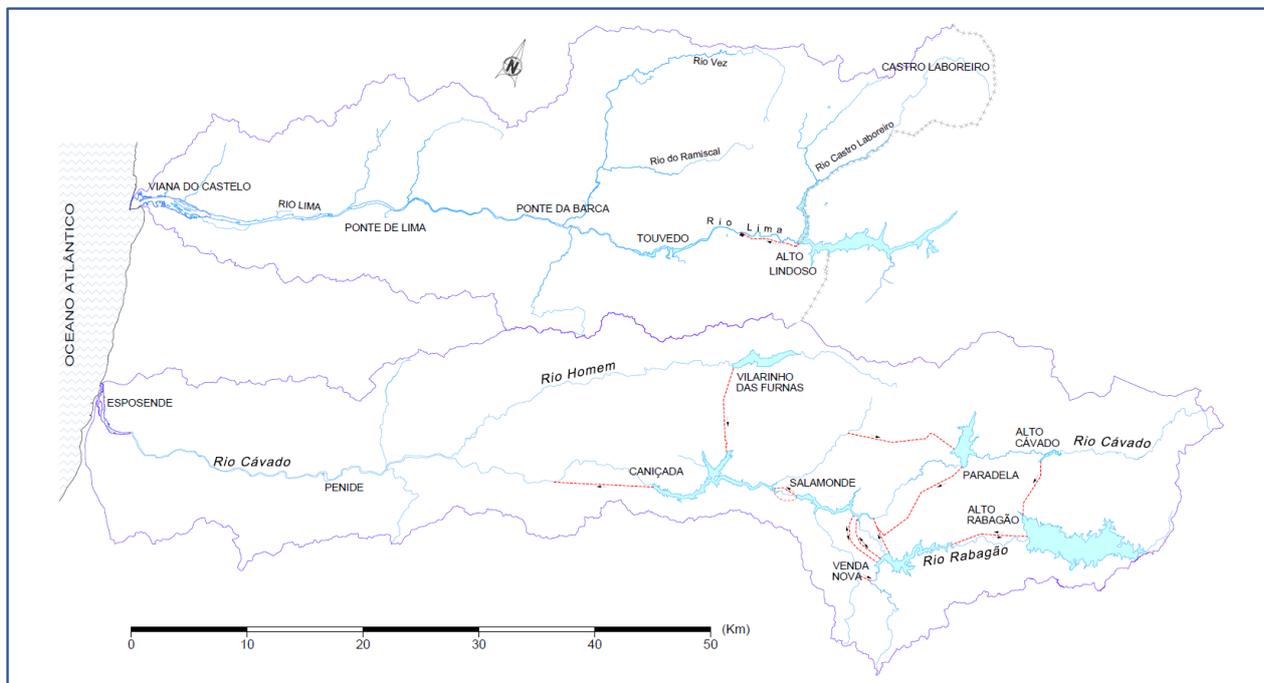


Fig. 3 – Bacia hidrográfica e aproveitamentos dos rios Cávado e Lima.

Na bacia do Douro, a HED começou por executar os aproveitamentos hidroelétricos no troço internacional do rio Douro atribuído a Portugal pelo *Convénio Luso-Espanhol para Regular o Aproveitamento Hidroeléctrico do Troço Internacional do rio Douro*, de 1927, nos termos do qual Portugal ficou com o direito de utilização da metade do troço a montante e Espanha com a metade a jusante. No que concerne a Portugal, foram construídos três escalões: Picote (195 MW) com entrada em serviço em 1958, Miranda (180 MW) localizado a montante daquele e com entrada em serviço em 1960, e Bemposta (240 MW) localizado a jusante dos anteriores e com entrada em serviço em 1964 (Figura 4).

Concluídos estes, o plano de realizações da HED focou-se no aproveitamento do troço nacional do rio Douro e seus afluentes. Nestes, o primeiro aproveitamento a ser construído seria o de Vilar Tabuaço (58 MW), no rio Távora, afluente da margem esquerda do rio Douro, cuja concessão havia sido atribuída à Hidro-Eléctrica Portuguesa (HEP) em 1947. Com os trabalhos preliminares iniciados em 1958, a HEP veio a acordar, em 1962, a cedência de direitos à HED, a qual reviu o projeto do aproveitamento que viria a entrar em serviço em 1965 (Figueira, 2012). Este foi o último grande aproveitamento a entrar em serviço na década de 60 e o sétimo com a central instalada em caverna, tipo de solução até então adotada nos restantes aproveitamentos realizados pela HED e nos aproveitamentos de Salomonde, Caniçada e Alto Rabagão realizados pela HICA.

Na segunda metade desta década, regista-se, contudo, uma retoma de realizações com o lançamento das obras dos escalões de Carrapateiro (201 MW), Régua (180 MW) e Valeira (240 MW) no troço nacional do rio Douro (Figura 4), promovidos pela HED, de Fratel (132 MW) no rio Tejo, promovido pela HEZ, e de Vilarinho das Furnas (1ª fase) na bacia do Cávado, promovido pela HICA. A central do aproveitamento de Vilarinho das Furnas, implantada na margem direita da albufeira da de Caniçada, embora preparada para receber dois grupos, seria equipada nesta fase apenas com o



Fig. 4 – Grandes aproveitamentos hidroelétricos na bacia do Douro.

primeiro grupo alimentado a partir da albufeira da barragem de Vilarinho das Furnas implantada no rio Homem (Figura 3).

Entretanto, no final de 1969, é criada a CPE – Companhia Portuguesa de Electricidade, que decorre da fusão das Hidro-Eléctricas do Cávado, Douro e Zêzere, incluindo também a Empresa Termoeléctrica Portuguesa (centrais termoeléctricas do Carregado e a de Tapada do Outeiro) e a Companhia Nacional de Electricidade (subestações e linhas). Na sequência da nacionalização, ocorrida em 1975, e processo de fusão de várias empresas do setor elétrico que atuavam em Portugal Continental, é criada em 1976, pelo Decreto-Lei nº 502 de 30 de junho, a *Electricidade de Portugal – Empresa Pública*, abreviadamente EDP ², onde a CPE é integrada (Madureira e Baptista, 2002). É nesta conjuntura que, na década de 70, são concluídas e entram em serviço as centrais de Carrapatelo (1971), Vilarinho das Furnas - 1ª fase (1972), Régua (1973), Fratel (1974) e Valeira (1976). No referente aos recursos hidroelétricos da bacia hidrográfica do rio Mondego (Figura 5), a incumbência do inventário, que havia sido atribuída à HEZ (1966), passou para a CPE à qual foi adjudicada (1970) a concessão do aproveitamento hidroelétrico do rio Mondego (Figueira, 2012). Em 1972, a CPE inicia as obras do escalão da Aguieira (336 MW), dotado de grupos reversíveis, tendo a central entrado em serviço em 1982. Neste ano, são ainda concluídas as obras de Raiva (24 MW) cuja albufeira constitui o reservatório para a bombagem no escalão de Aguieira. Deste escalão, fazem ainda parte a barragem de Fronhas (1985) e o túnel, com 8200 metros de extensão, que permitem o desvio das aflúências do rio Alva para a albufeira da Aguieira (Neiva e Lima, 1990).

Na década de 80, serão concluídos os últimos aproveitamentos hidroelétricos implantados no troço nacional do rio Douro - Pocinho (186 MW) em 1983 e Crestuma (117 MW) em 1985 – (EDP, 1986), e construído o aproveitamento de Torrão (140 MW) no rio Tâmega, afluente do rio Douro da margem direita, com circuito hidráulico subterrâneo e dois grupos reversíveis, que viria a entrar em serviço em 1988. Foi instalado em Vilarinho das Furnas um segundo grupo, este reversível, entrado em serviço em 1987, perfazendo uma potência instalada de 125 MW no conjunto dos dois grupos.

A década de 90 viria a ser marcada pela entrada em serviço, em 1992, da central do aproveitamento hidroelétrico de Alto Lindoso, no rio Lima, caracterizada por, então, ter a mais elevada potência instalada (630 MW) numa hidroelétrica em Portugal (Figura 3). Com a função básica de modular os caudais turbinados nesta central, foi construída, cerca de 17 km a jusante, a barragem de Touvedo, cuja central (22 MW), implantada na continuidade da barragem, viria a entrar em serviço em 1993 (EDP, 1993).

² A EDP viu o seu estatuto jurídico alterado para Sociedade Anónima em 1991. Em 1994 foi constituído o Grupo EDP, em 1997 verificou-se a 1ª fase da sua privatização, tendo a Parpública (empresa que gere as participações do Estado) vendido as últimas ações detidas na EDP em 2013. Em 2004 o Grupo EDP alterou a sua designação para Energias de Portugal.

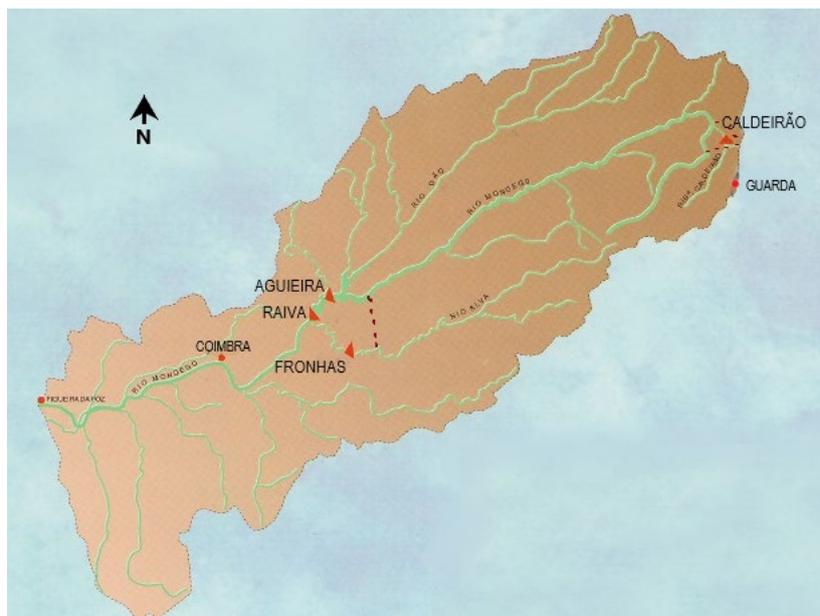


Fig. 5 – Aproveitamentos hidroelétricos do sistema Agueira-Raiva-Fronhas e de Caldeirão.

Ainda nesta década, entraram em serviço: i) a central de Sabugueiro II (10 MW) em 1993, alimentada pelas águas das albufeiras das barragens de Lagoacho e de Vale do Rossim, conectadas por túnel (Figura 6a); ii) a nova central de Pracana (25 MW) em 1993, inserida nas obras de reabilitação e remodelação do aproveitamento; iii) a central do aproveitamento de fins múltiplos do Caldeirão (40 MW) em 1994, cujas obras incluíram a construção de açude no rio Mondego e a

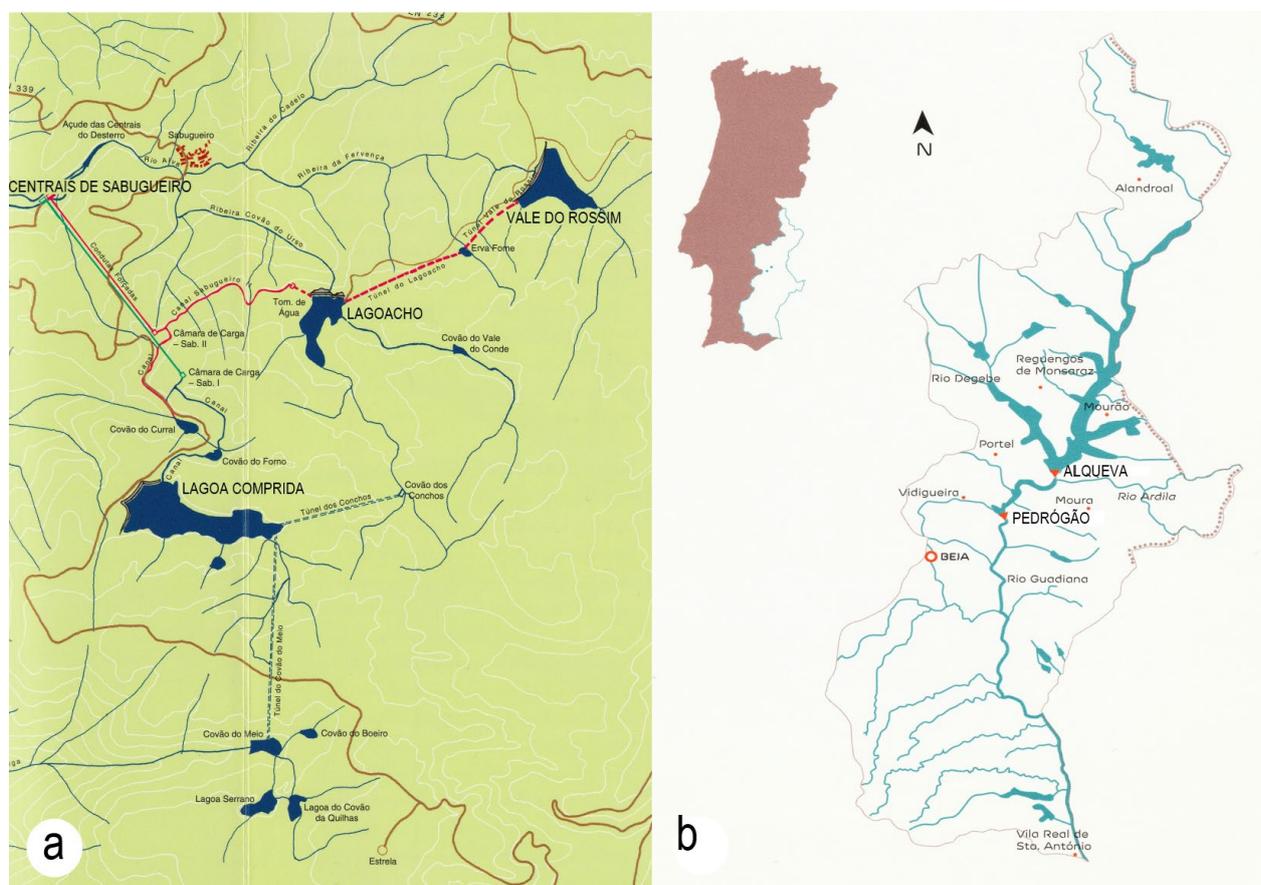


Fig. 6 – Aproveitamentos hidroelétricos. a) Sabugueiro; b) Sistema Alqueva/Pedrógão.

derivação deste, em túnel (2700 m), para a ribeira do Caldeirão (Neiva et al, 1994)., onde foi construída a barragem cuja albufeira alimenta o circuito hidráulico e a central do aproveitamento que restitui a água ao Mondego (Figura 5); iv) a nova central de Miranda (189 MW), no rio Douro, em 1995, instalada em poço e com circuito hidráulico em túnel, que, visando a otimização dos recursos disponibilizados por estruturas existentes, foi o primeiro de três reforços de potência que viriam a ser construídos na bacia do Douro (EDP, 2011b).

Integrada no empreendimento de fins múltiplos de Alqueva, entraria em serviço, no ano de 2004, a central hidroelétrica de Alqueva, de pé de barragem, no rio Guadiana, equipada com dois grupos geradores reversíveis com a potência instalada total de 259 MW em modo turbina. A operação desta central é conjugada com a exploração da albufeira criada pela barragem de Pedrógão, localizada cerca de 18 km a jusante da barragem de Alqueva, cuja central (10 MW) entrou em serviço em 2006 (Figura 6b).

No Cávado/Rabagão daria entrada em serviço, em 2005, o reforço de potência de Venda Nova II (191 MW), com dois grupos reversíveis, instalados em caverna, e circuito hidráulico subterrâneo que conecta as albufeiras de Venda Nova e Salamonde.

Na década imediata, fruto da aposta e assinalável investimento do Grupo EDP nas energias renováveis, deram entrada em serviço dez novas centrais hidroelétricas, a que corresponde um incremento total da potência instalada de 2253 MW (EDP Produção, 2019). Destas, metade são reforços de potência de aproveitamentos existentes, os quais são predominantemente obras subterrâneas, e as restantes integradas em novos aproveitamentos hidroelétricos, mas também com importantes obras subterrâneas (Quadro 1).

Quadro 1 – Reforços de potência da segunda década do século XXI (EDP Produção, 2019).

Reforço de potência	Entrada em serviço	Central			Aproveitamento hidroelétrico	Entrada em serviço	Central		
		Tipo	Potência instalada (MW)	Nº de grupos			Tipo	Potência instalada (MW)	Nº de grupos
Picote II	2011	caverna	246	1	Ribeiradio	2015	poço	74,7	1
Bemposta II	2011	poço	203	1	Ermida		contínua à barragem	7,6	2
Alqueva II	2012	margem	259	2 - R	Baixo Sabor	2016	poço	153	2 - R
Salamonde II	2016	caverna	224	1 - R	Feiticeiro		poço	36	2 - R
Venda Nova II	2017	caverna	780	2 - R	Foz Tua	2017	poço	270	2 - R

R - Reversível

3 – OBRAS SUBTERRÂNEAS NAS BARRAGENS

As obras de derivação provisória, na fase de construção, assim como os descarregadores de cheias e as descargas de fundo, na fase de exploração dos empreendimentos, são órgãos específicos dimensionados para garantir a segurança hidráulica e estrutural da barragem.

No caso de vales estreitos de rios com caudais significativos, a solução frequentemente adotada para as obras de derivação passa pela condução das águas através dum túnel e da construção de enscadeiras que deixam a seco a zona de implantação da barragem. Tal solução foi adotada em barragens de aproveitamentos hidroelétricos construídos nos rios Lima, Cávado/Rabagão/Homem (exceto Alto Cávado), Douro internacional, Tua, Távora, Tâmega, Zêzere (Figura 7) e, ainda, nas



Fig. 7 – Castelo do Bode. Derivação provisória: a) trabalhos iniciais; b), c) e d) secção corrente, entrada e saída do túnel de derivação; e) leito do rio a seco; f) ensecadeiras (vista de jusante).

barragens de Baixo Sabor, Agueira e Alqueva implantadas, respetivamente, nos rios Sabor, Mondego e Guadiana.

Previamente ao enchimento da barragem, na sua maioria, os túneis de desvio foram colocados fora de serviço e obturados com rolhões de betão. São exceção os túneis de desvio nas barragens de Bouçã, Agueira e Alqueva, que serviram para incorporar as descargas de fundo, os das barragens de Pracana e Paradela, que foram adaptados para descarregadores de cheia em poço com bocal em tulipa (Figura 8), e o da barragem de Miranda, que foi convertido em descarga auxiliar. Os aproveitamentos hidroelétricos de Paradela e Vilar-Tabuaço, ambos com barragem de enrocamento, são casos singulares onde foram realizados túneis específicos para a descarga de fundo.

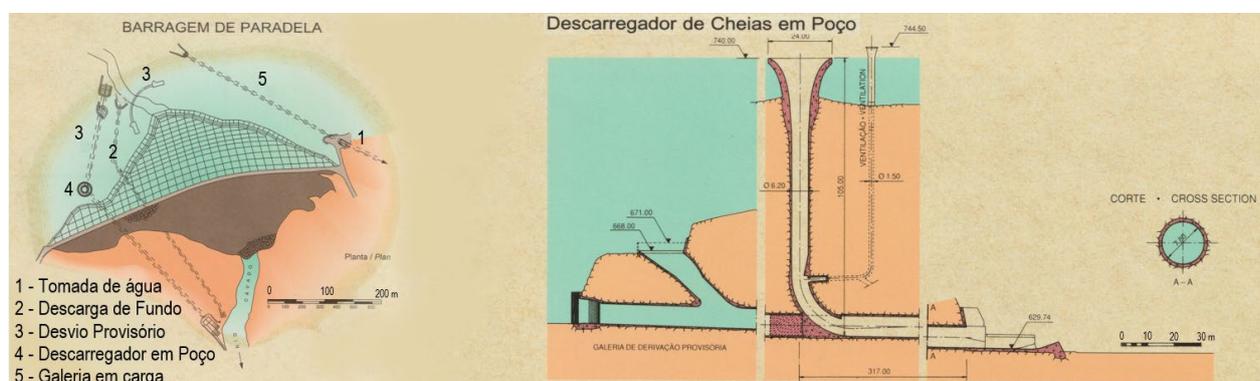


Fig. 8 – Barragem de Paradela e perfil longitudinal do descarregador de cheias (EDP, 2006c).

Soluções de descarregador em túnel, sem poços, foram implementadas na sua conceção de origem nas barragens de Cabril, Vilarinho das Furnas e Alto Lindoso e, ainda, num segundo descarregador na albufeira de Paradela, situado a cerca de 1 km da barragem, junto ao açude de Telheira. Decorrente de estudos de revisão dos caudais de cheia e análise da adequação dos órgãos de descarga, o segundo descarregador de Paradela viria a ser colocado fora de serviço após a construção do descarregador auxiliar, em canal, na encosta da margem direita da barragem. Resultante de idênticos estudos, foram ainda construídos novos descarregadores de cheia em Pracana, Salamonde (Figura 9) e Caniçada, os dois últimos com solução em túnel (Quadro 2).

Quadro 2 – Barragens de aproveitamentos com descarregador de cheias subterrâneo (EDP, 2011a)

Aproveitamento hidroelétrico	Barragem			Descarregadores		
	Tipo	H (m)	L (m)	Tipo	Q _{máx} (*) (m ³ /s)	Notas
Pracana	contrafortes	60	245,6	poço	1700	equipado com comporta cilíndrica
				canal na encosta	860	complementar
Cabril	abóbada	132	291	túnel	2 x 1150	dois túneis, um em cada margem
Paradela	enrocamento	112	541	poço	530	
				canal na encosta	650	complementar
Vilarinho	abóbada	94	398,4	túnel	285	
Alto Lindoso	abóbada	110	298	túnel	2 x 1350	dois túneis, na margem direita
Salamonde	abóbada	75	285	lâmina livre	1595	
				túnel	1235	complementar
Caniçada	abóbada	76	247	lâmina livre	1700	
				túnel	2060	complementar

H - altura máxima; L - desenvolvimento do coroamento; Q_{máx} - caudal máximo descarregado para cheia de projeto revista, exceto Alto Lindoso (cheia de projeto inicial).

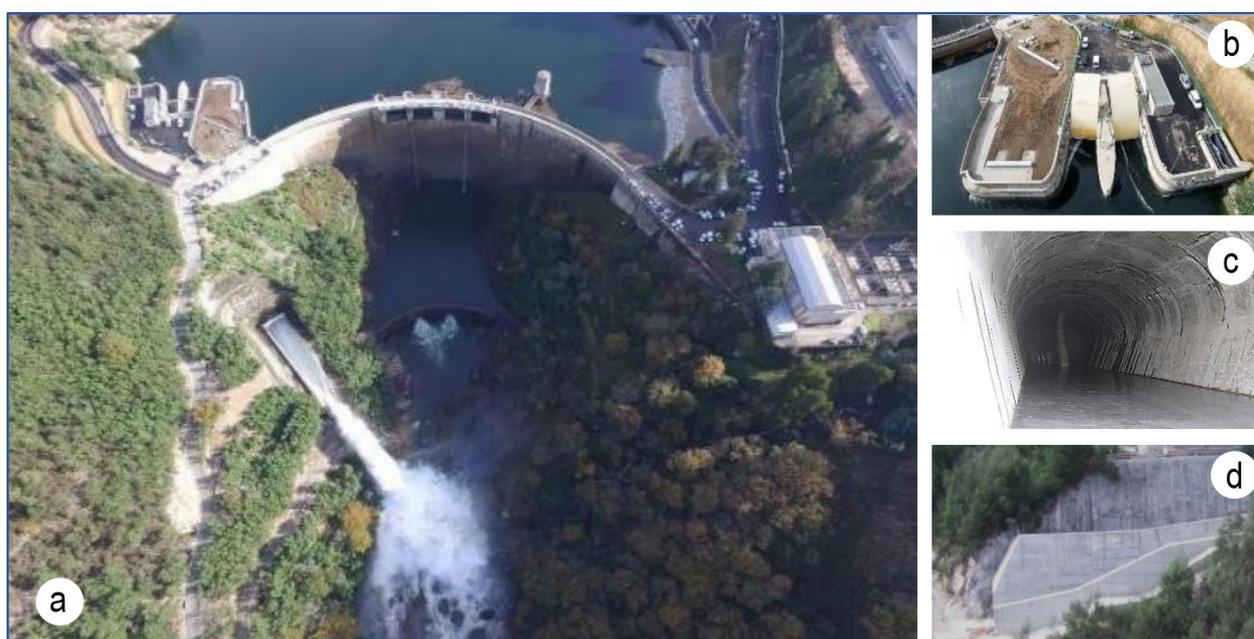


Fig. 9 – Fotos do descarregar complementar da barragem de Salamonde: a) vista aérea na fase de ensaio; b) estrutura de entrada; c) túnel; d) estrutura de saída.

Nas barragens de betão, é usual proceder-se à melhoria das condições hidráulicas e mecânicas da fundação, com recurso a tratamentos com injeções de cimento e a redes de drenagem materializadas por furos. Este tipo de trabalhos assume maior relevância no caso de estruturas de grande envergadura, com destaque para o caso das barragens abóbada.

Dos aproveitamentos hidroelétricos entrados em serviço nas últimas quatro décadas, para além daqueles tratamentos, foram escavadas galerias de fundação nas barragens abóbada de maior dimensão (Aguieira, Alto Lindoso, Alqueva, Baixo Sabor e Foz Tua) com múltiplos objetivos: melhor caracterização do terreno de fundação, drenagem e monitorização do comportamento da estrutura na fase de exploração. A título de exemplo, na Figura 10 mostra-se uma perspetiva tridimensional da barragem de Foz Tua, com a representação das galerias (duas por encosta) e zona da fundação objeto de tratamento de consolidação por injeções de cimento.

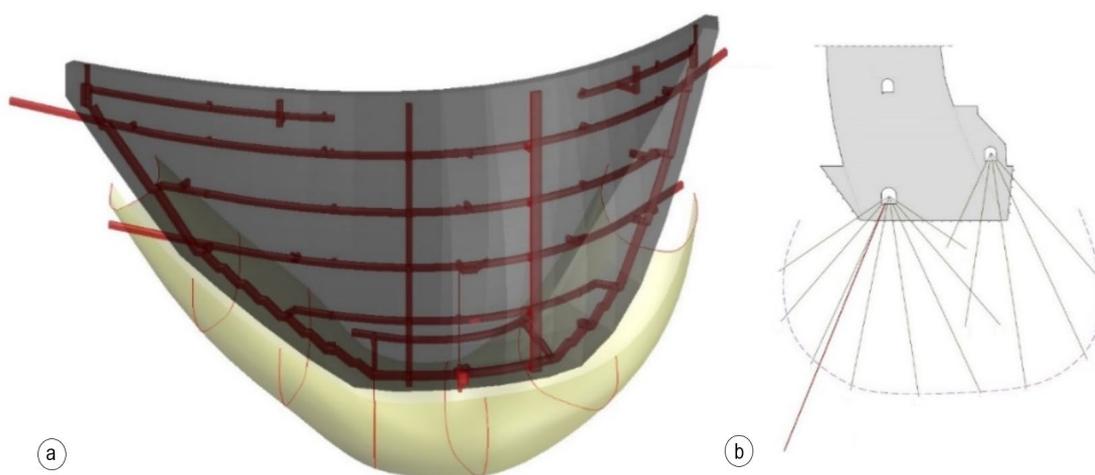
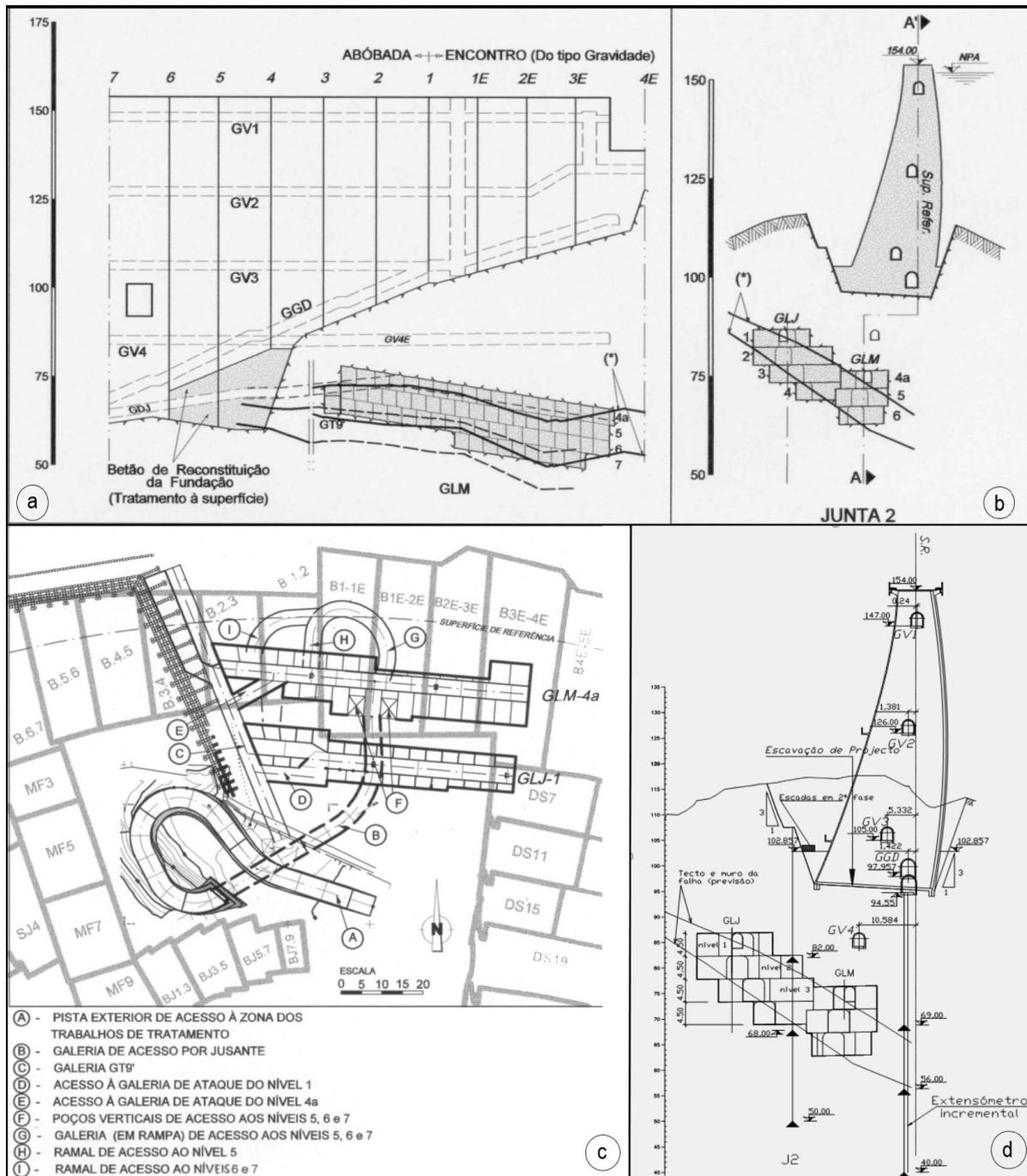


Fig. 10 – Barragem de Foz Tua: a) perspetiva com a representação da barragem, galerias de fundação e zona objeto de tratamento de consolidação; b) corte tipo com a representação dos furos de injeção do maciço de fundação (Figueiredo et al., 2018).

Tal como no caso de Foz Tua, as galerias de fundação das barragens de Alto Lindoso e de Alqueva são quase horizontais, com origem na galeria geral de drenagem, e posicionadas em níveis distribuídos pelas encostas. No caso da fundação da barragem de Alqueva, a ocorrência de uma espessa zona conturbada com elevada deformabilidade e baixa resistência, associada à falha 22 (Figura 11), cortando a margem esquerda e mergulhando para montante intersectando o contacto barragem-fundação na transição para o fundo do vale, conduziu a um tratamento subterrâneo de substituição de tal material por betão, em zonas-chave previamente definidas, por forma a constituir uma estrutura rígida adequada à transmissão dos esforços do teto para o muro da zona conturbada.

A solução adotada no processo de substituição por betão, consistiu em escavações de pequeno porte seguidas de betonagens, por níveis subhorizontais, de forma descendente, com o teto das escavações em rocha sã para o 1.º nível e betão para os restantes. Em cada nível, abriu-se uma galeria central com cerca de 70m de extensão (GLM e GLJ) a partir da qual a mesma foi sendo alargada lateralmente. Estes alargamentos foram conseguidos com recurso a galerias perpendiculares à galeria central, de secção idêntica, executadas alternadamente e com comprimento variável (4 a 12 m) estabelecido em função da geometria da zona conturbada (Liberal et al., 2002).

No caso da barragem de abóbadas múltiplas da Aguieira, o traçado em planta das galerias desenvolve-se ao longo de alinhamentos próximos da inserção do contacto das abóbadas e apresenta dois ramais orientados segundo a direção dos contrafortes. A inserção altimétrica das galerias realizou-se alguns metros abaixo da superfície de contacto da estrutura com a rocha (Figura 12).



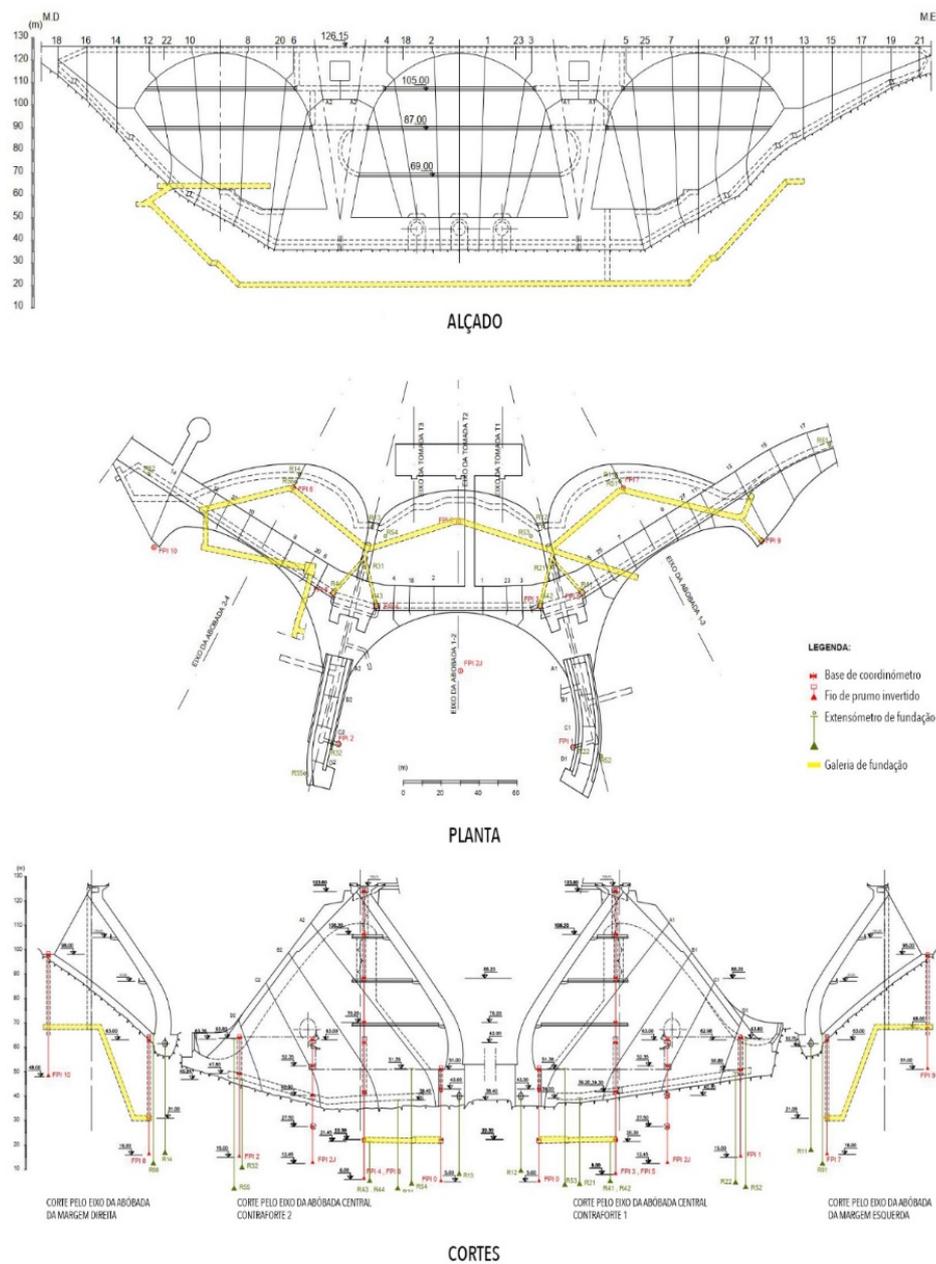


Fig. 12 – Barragem de Aguieira. Alçado, planta e cortes com a representação do sistema de observação (fios de prumo e extensómetros de fundação).

4 – OBRAS SUBTERRÂNEAS NAS CENTRAIS E CIRCUITOS HIDRÁULICOS

O tipo e diversidade das obras subterrâneas em centrais hidroelétricas está intimamente ligado ao layout adotado para o circuito hidráulico. Este é condicionado pela posição da central onde estão instalados os grupos geradores, pelo circuito de adução que alimenta os grupos a partir da tomada de água situada na albufeira e pelo circuito de restituição da água turbinada, mas também pelo desnível a vencer, condições geológicas, desafios na criação de acessos, condicionantes ambientais, custo-benefício dos métodos construtivos e evolução tecnológica dos equipamentos. No caso dos aproveitamentos reversíveis, a circulação da água faz-se no sentido inverso, passando a restituição a funcionar como tomada de água e, vice-versa, a tomada de água a funcionar como restituição.

Nos exemplos em que a central foi incorporada na barragem ou na continuidade desta³, ou implantada no pé da barragem⁴, resultam circuitos hidráulicos curtos com os respetivos trabalhos realizados a céu aberto. Nos exemplos em que as obras da central e circuito hidráulico são independentes da barragem, distinguem-se três tipos de situações definidos em função do posicionamento da central: na margem, em que as escavações para a central e restituição são a céu aberto, em poço e em caverna, estes implicando escavações subterrâneas para a central e circuito hidráulico.

4.1 – Aproveitamentos com central na margem

No caso específico das centrais implantadas na margem, as aduções poderão ser realizadas a céu aberto (canais e condutas), mas também materializadas por obras subterrâneas (túneis e poços) e, ainda, soluções mistas. Nos pontos seguintes, serão focados os layouts das soluções que incorporam obras subterrâneas (Quadro 3).

Quadro 3 – Obras subterrâneas nos aproveitamentos hidroelétricos com centrais na margem.

Aproveitamento hidroelétrico	Tomada de água	Adução	Restituição	Central				
	Albufeira / rio	L (m)	Albufeira / rio	Potência instalada (MW)	Grupo (nº)	Queda bruta máxima (m)	Queda bruta mínima (m)	Caudal máximo turbinável (m³/s)
Vila Nova / Venda Nova	Venda Nova Rabagão	3 591	Salamonde Cávado	90	3	414,2	354,8	3 x 8
Vila Nova / Paradela	Paradela Cávado	11 136	Salamonde Cávado	54	1	463,5	387,5	16,4
Caldeirão	Caldeirão Caldeirão	1 360	- Mondego	40	1	193	185,4	26
Bouçã	Bouçã Zêzere	2 x 76	Cast. de Bode Zêzere	44	2	56,5	52,5	2 x 50
Alqueva II	Alqueva Guadiana	360 (G1) 387 (G2)	Alqueva Pedrógão	259 - R	2	73 (*)	54,7 (*)	202

L - Comprimento; R - Reversível; (*) Valores de queda útil

Os três primeiros aproveitamentos do Quadro 3 caracterizam-se por terem circuitos de adução extensos, dotados de chaminé de equilíbrio, com parte em túnel e o restante em conduta metálica a céu aberto. Os dois últimos têm como característica comum o facto da central se localizar próximo da barragem, logo, com circuitos de adução curtos.

Os circuitos de adução de **Venda Nova** (Figura 13) e de **Paradela** (Figura 14) apresentam bastantes similitudes. Ambos possuem um troço inicial com pequena inclinação, após o qual se segue um troço em conduta forçada com grande declive até à central. Os órgãos de manobra da tomada de água são acionados através de poço vertical implantado na margem de cada albufeira. Em ambos, a chaminé de equilíbrio está instalada pouco a montante da conduta forçada.

³ Centrais nos grandes aproveitamentos, contíguas ou no corpo da barragem: Pocinho, Valeira, Régua, Carrapateiro e Crestuma, no rio Douro; Touvedo, no rio Lima; Raiva, no rio Mondego; Fratel e Belver, no rio Tejo; Pedrógão, no rio Guadiana.

⁴ Centrais nos grandes aproveitamentos do tipo “pé de barragem”: Castelo do Bode e Cabril, no rio Zêzere; Agueira, no rio Mondego; Pracana, no rio Ocreza; Alqueva I, no rio Guadiana.

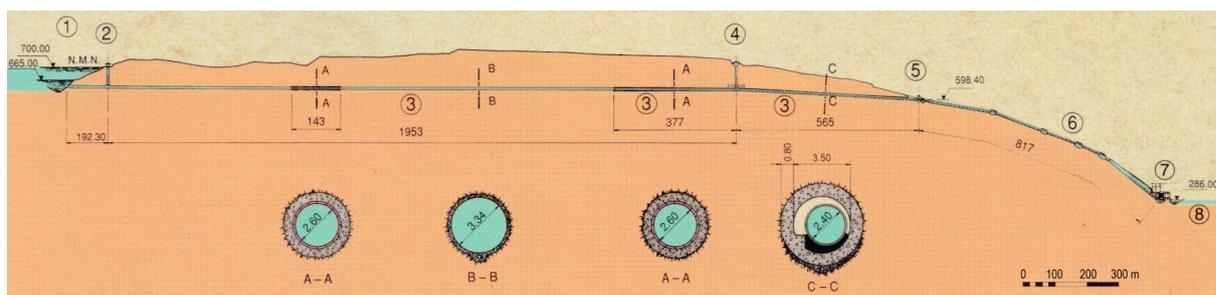


Fig. 13 – Circuito hidráulico de Venda Nova / Vila Nova. Corte: 1- albufeira de Venda Nova; 2 – poço de manobra da tomada de água; 3 – galeria de carga; 4 – câmara de equilíbrio; 5 – válvula de topo; 6 – conduta forçada; 7 – central; 8 – albufeira de Salamonde.

No aproveitamento de Paradela, após o bocal da tomada de água, segue-se um troço de 343 m de comprimento até à zona onde se insere o poço de manobra da comporta e grade fina da tomada de água, este com 82 m de altura e 4,6 m de diâmetro. O circuito, com 11,1 km de desenvolvimento total, inclui um troço em túnel com 8,2 km de extensão e 2,80 m de diâmetro nas zonas com revestimento de betão e 2,25 m nas zonas em que é blindado. Segue-se-lhe uma zona em conduta metálica, a céu aberto, com 660 m de extensão e diâmetro de 2,35 m, e um segundo túnel com 1240 m de extensão. Neste, distinguem-se dois troços: o primeiro, com 950 m e diâmetro de 2,25 m, é blindado com chapa de aço; o segundo, com 2,90 m, é constituído por uma galeria visitável de 3,35 m de diâmetro, no interior da qual foi instalada uma conduta metálica de 2,25 m de diâmetro. Esta continua a desenvolver-se, a céu aberto, em trainéis com inclinações variáveis até ao máximo de 80 %, numa extensão de 1036 m até à central de Vila Nova (EDP, 2006c).

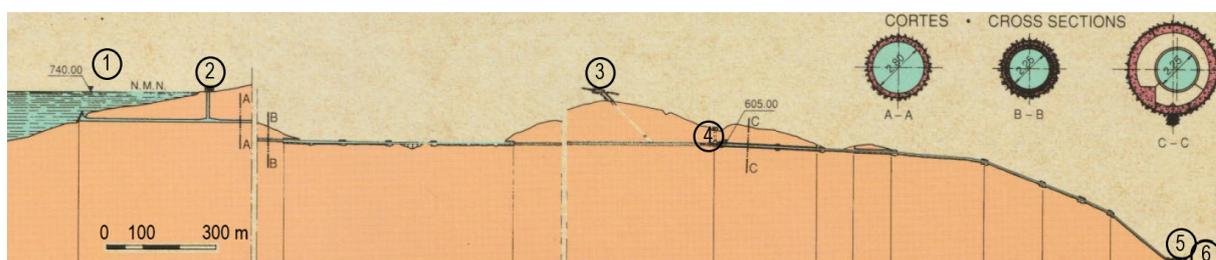


Fig. 14 – Circuito hidráulico de Paradela / Vila Nova. Corte: 1- albufeira de Paradela; 2 – poço de manobra da tomada de água; 3 – câmara de equilíbrio; 4 – válvula de topo; 5 – central; 6 – albufeira de Salamonde.

A configuração do circuito do aproveitamento de **Caldeirão** (Figura 15) tem algumas similitudes com a dos aproveitamentos anteriores. Apresenta um primeiro troço pouco inclinado em túnel revestido de betão (985 m de desenvolvimento e 3,10 m de diâmetro interno), onde se insere a chaminé de equilíbrio (com 4,20 m de diâmetro e 39 m de altura, dotada de câmara de expansão e câmara de alimentação), e um segundo troço em conduta forçada (375 m), com diâmetro variável (2,60 m a 1,67 m), implantada à superfície ao longo da vertente da encosta até terminar na central.

No referente ao aproveitamento de **Bouçã**, a tomada de água localizada muito próximo da barragem, mas completamente independente desta, é constituída por um poço onde estão instaladas as duas comportas de segurança, do tipo lagarta, correspondentes a cada um dos túneis do circuito de adução, estes com 3,5 m de diâmetro e com revestimento metálico (Figura 16). O poço, com 9 m de diâmetro, é continuado por uma torre vertical onde estão instaladas seis grades metálicas em disposição circular. A torre é rematada por um pavimento estabelecido acima do nível de máxima cheia onde estão instalados os servomotores e os restantes órgãos de manobra das comportas (EDP, 2006b).

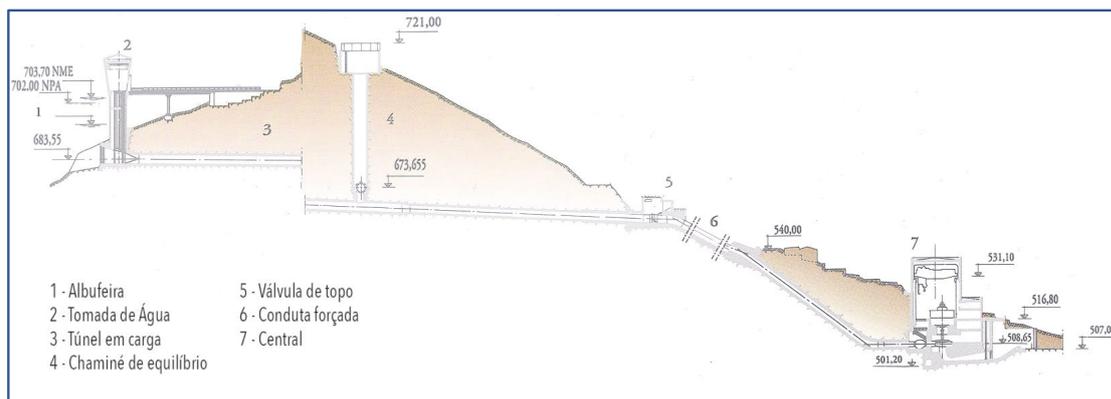


Fig. 15 – Circuito hidráulico do aproveitamento de Caldeirão.

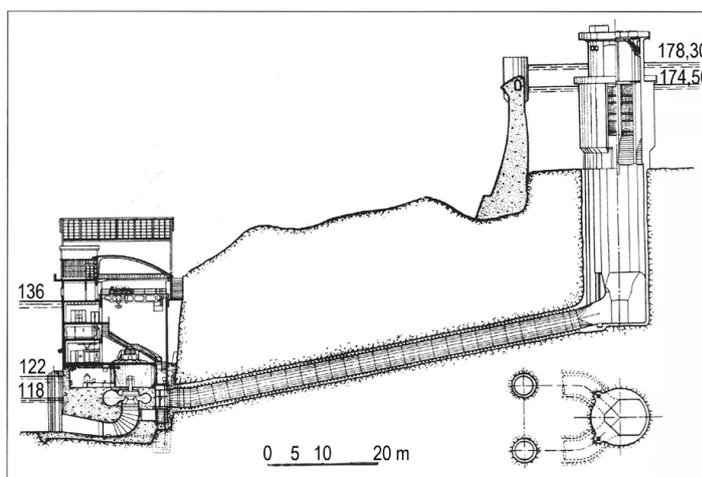


Fig. 16 – Circuito hidráulico do aproveitamento de Bouçã. Corte pela tomada de água e central.

Integrada no Aproveitamento Hidroelétrico de Fins Múltiplos de Alqueva, **Alqueva II** constitui o reforço de potência do escalão de Alqueva, cuja estrutura principal de retenção, a barragem de Alqueva, gera, à cota de pleno armazenamento, o lago artificial com maior capacidade (4 150 000 m³) da Europa.⁵

A central de Alqueva II, equipada com dois grupos reversíveis com potência e características técnicas similares às da central de Alqueva I, foi implantada na margem direita em local onde existia uma plataforma, à cota (100), imediatamente a jusante do encontro direito da barragem (EDP Produção, 2019). O circuito hidráulico é constituído por dois túneis de adução com 8,50 m de diâmetro interior e 360/387 metros de extensão, revestidos a betão armado e blindados nos últimos 80/100 metros que antecedem os grupos geradores. Em perfil longitudinal, cada túnel comporta dois troços subhorizontais nos extremos da adução conectados por poço vertical num ponto intermédio, o que permite o cruzamento dos circuitos em planta (Figura 17).

As escavações da tomada de água e o ataque por montante aos túneis de adução foram realizados ao abrigo duma ensecadeira materializada com vigas pré-fabricadas de betão inseridas em ranhuras de uma estrutura pré-existente que foi executada aquando da construção da barragem de Alqueva. Tal permitiu que as obras do reforço de potência não trouxessem condicionamentos à exploração da albufeira de Alqueva.

⁵ A concessão da gestão e exploração deste projeto de fins múltiplos foi atribuída pelo Estado Português à empresa de capitais públicos EDIA – Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas do Alqueva, S.A. que, em outubro de 2007, sub-concessionou a componente hidroelétrica à EDP Produção por um prazo de 35 anos.

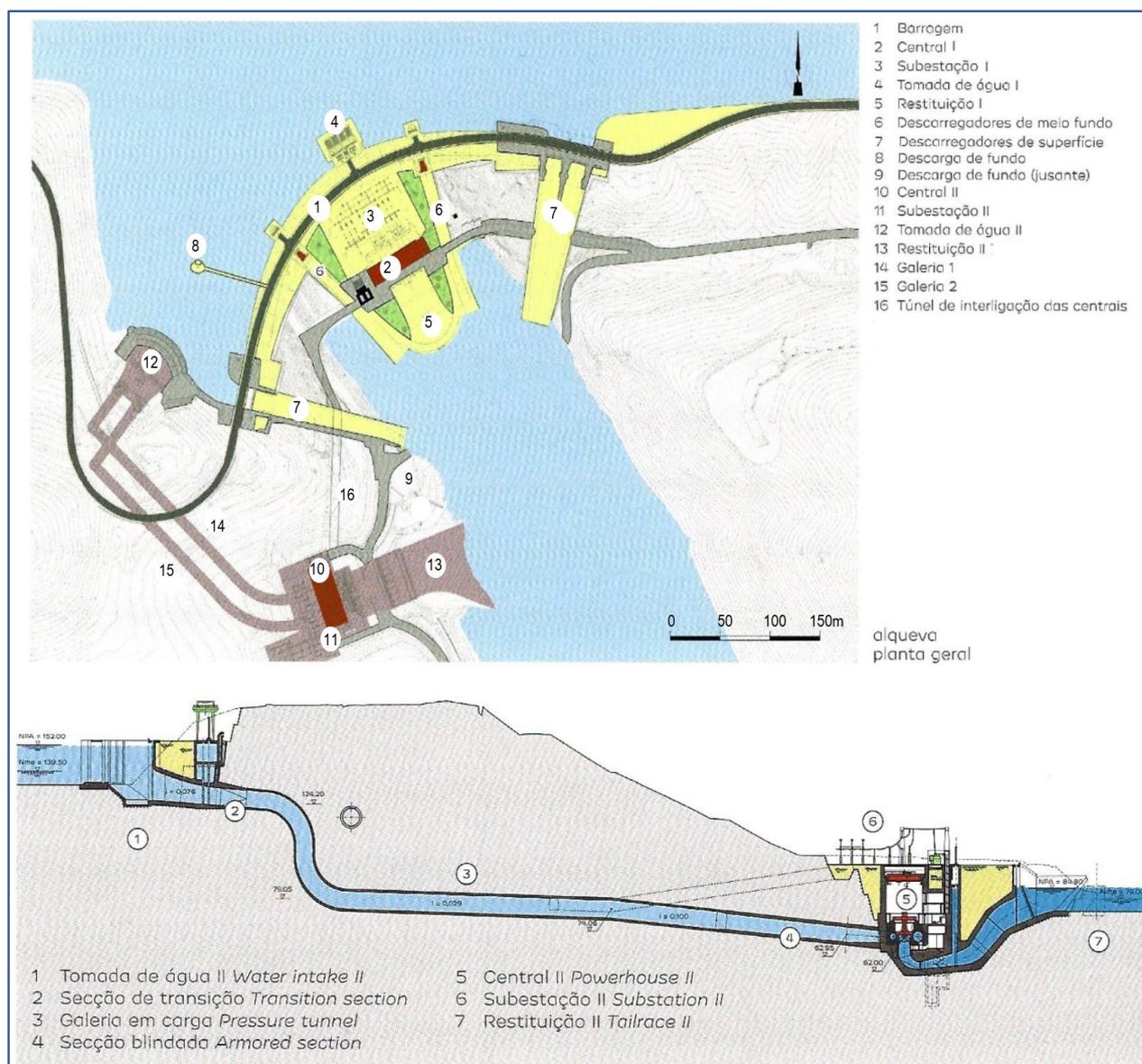


Fig. 17 – Escalão de Alqueva. Planta geral e corte pelo circuito hidráulico de Alqueva II.

O ataque à zona de jusante dos túneis de adução foi feito através de um túnel auxiliar com cerca de 140 m de desenvolvimento, aberto a partir da plataforma existente à cota (100). Os túneis foram escavados com recurso a explosivos, tendo sido abertos os respetivos troços verticais por *raise-boring*.

As escavações profundas, que originaram taludes com uma altura máxima de 95 metros, e a subsequente construção das estruturas da central foram executadas ao abrigo de uma ensecadeira de pequeno porte, em betão, edificada sobre uma estreita faixa de terreno na margem da albufeira de Pedróvão.

O edifício da central, com dimensões em planta de 39,7 m x 79,1 m, tem como ponto mais baixo a fundação do poço de esgoto e drenagem à cota (30,50), e a cobertura à cota (96,00), pelo que está parcialmente imerso. O espaço na envolvente da central, entre esta e os taludes de escavação, foi preenchido com aterro, permitindo a criação duma plataforma ao nível da cobertura onde foram implantados o edifício de comando e a subestação. Partindo desta plataforma e passando por baixo do descarregador, foi construída uma ligação por túnel entre as centrais de Alqueva I e Alqueva II, de modo a aumentar a eficiência em termos de operação, manutenção e vigilância.

4.2 – Aproveitamentos com central em poço

Uma particularidade das centrais em poço decorre da interação da estrutura de suporte das paredes da central com o maciço envolvente que, em muitas circunstâncias, permite soluções económicas das estruturas resistentes (em anel) e, também, eficazes quanto à estanqueidade dos espaços subterrâneos.

No Quadro 4, apresentam-se algumas características dos aproveitamentos com central em poço. Estes caracterizam-se por ter circuitos com restituição curta e central próxima da linha de água ou da albufeira de jusante. Com a exceção do aproveitamento de Vilarinho das Furnas, as aduções dos restantes são relativamente curtas, dotadas de blindagem metálica na chegada à central e revestidas com betão armado na parte restante.

O Torrão e o Feiticeiro dispõem de tomadas de água com estruturas em poço incorporadas, bem como o Feiticeiro e Foz Tua no que respeita à restituição. Registe-se o facto de as centrais de Bemposta II, Feiticeiro e Foz Tua apresentarem um átrio de descarga e montagem enterrado, enquanto as restantes usufruem de um edifício à superfície.

Do conjunto destes aproveitamentos, Miranda II e Bemposta II constituem reforços de potência de aproveitamentos do Douro internacional, equipados com um grupo que apenas funciona em modo turbina. As restantes centrais têm dois grupos reversíveis, à exceção de Ribeiradio e de Vilarinho das Furnas (1ª fase) que foram equipadas com um grupo não reversível. O segundo grupo deste último aproveitamento é reversível e entrou em serviço 15 anos após o primeiro grupo.

Quadro 4 – Obras subterrâneas nos grandes aproveitamentos com centrais em poço.

Aproveitamento hidroelétrico	Central				Adução	Restituição
	Potência instalada (MW)	Número de grupos	Queda útil (m)	Caudal máximo turbinável (m ³ /s)	L (m)	L (m)
Vilarinho das Furnas	125	1 1 - R	413 - G1 412,2 - G2	19,7 - G1 20,2 - G2	7 670	18
Torrão	140	2 - R	52,1	2 x 161	166 - G1 218 - G2	55
Baixo Sabor	153	2 - R	102,9	2 x 85	243 - G1 332 - G2	61
Feiticeiro	36	2 - R	34,5	2 x 60	120 - G1 120 - G2	50
Ribeiradio	74,7	1	64	125	203	63
Foz Tua	270	2 - R	96	2 x 162	498 (G1) 552 (G2)	62 (G1) 82 (G2)
Miranda II	189	1	55,6	386	200	27
Bemposta II	203	1	63,8	350	400	64

L - Comprimento; R - Reversível

4.2.1 – Centrais de novos aproveitamentos

O aproveitamento de **Vilarinho das Furnas**, o primeiro a ser construído com central em poço, tem um circuito de adução algo similar ao das aduções dos aproveitamentos de Venda Nova / Vila Nova e de Paradela / Vila Nova, com centrais na margem.

Após a tomada de água na albufeira da barragem de Vilarinho das Furnas, no rio Homem, segue-se um troço do túnel pouco inclinado, em carga, com uma extensão aproximada de 6800 m e um diâmetro variável de cerca de 2,5 m. No final do túnel e imediatamente antes da conduta forçada, situa-se a chaminé de equilíbrio, com 96 m de altura e um diâmetro médio de 3,5 m, dotada de uma câmara de expansão e outra de alimentação. Segue-se a ligação à conduta forçada, que conduz a água até à central, 340 m mais abaixo. A conduta desenvolve-se à superfície, ao longo da encosta e, próximo da central, subdivide-se em dois ramais inseridos em poços inclinados que alimentam cada um dos grupos. As respetivas restituições fazem-se para a albufeira de Caniçada através de túnel. (Figura 18).

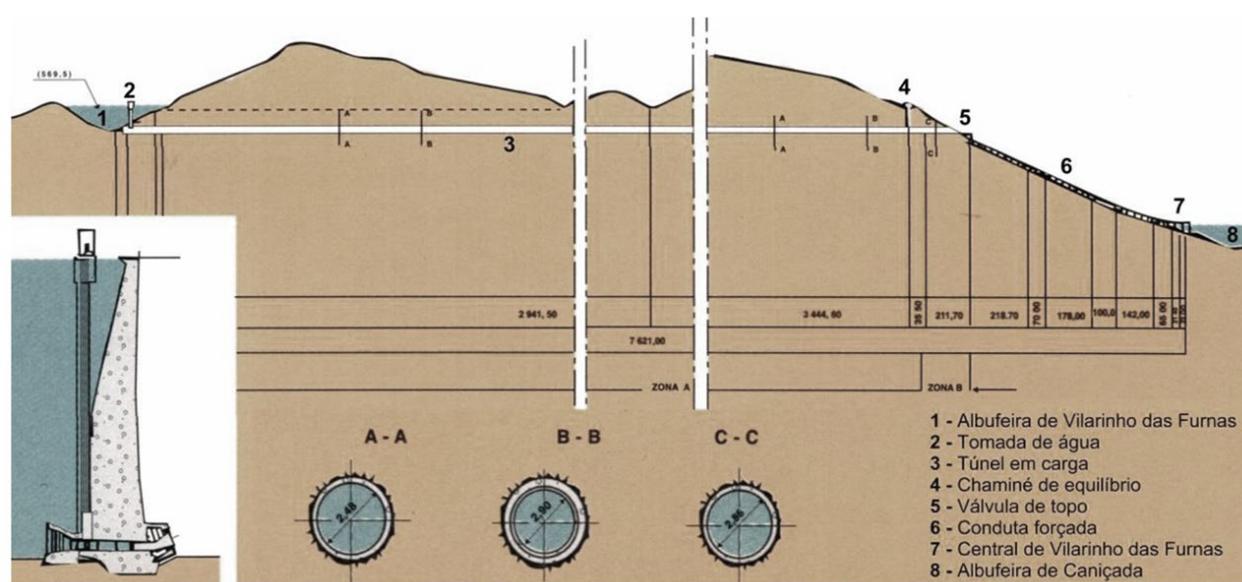


Fig. 18 – Vilarinho das Furnas. Esquema geral do circuito hidráulico.

Os grupos encontram-se em dois poços independentes que distam entre si cerca de 9 m. Aquando da implantação do 1º grupo, foram executados trabalhos prevendo a instalação futura dum grupo idêntico, tendo-se, para o efeito, efetuado as escavações e o revestimento com betão dum poço similar destinado ao 2º grupo. Decorrente de decisão posterior de instalar um grupo reversível, houve necessidade de reformular o projeto das escavações, o que implicou o rebaixamento da escavação já efetuada e a abertura duma câmara para alojamento de equipamento, para além da escavação do túnel de restituição e do poço inclinado da adução (Figura 19). Estes trabalhos foram realizados com o 1º grupo em funcionamento, o que levou a condicionamentos do uso de explosivos e monitorização apertada dos seus efeitos. Assim, o poço do 1º grupo tem uma profundidade de cerca de 16,5 m e um diâmetro de 15,5 m, enquanto o poço do 2º grupo tem uma profundidade de cerca de 33 m e um diâmetro de, aproximadamente, 17 m.

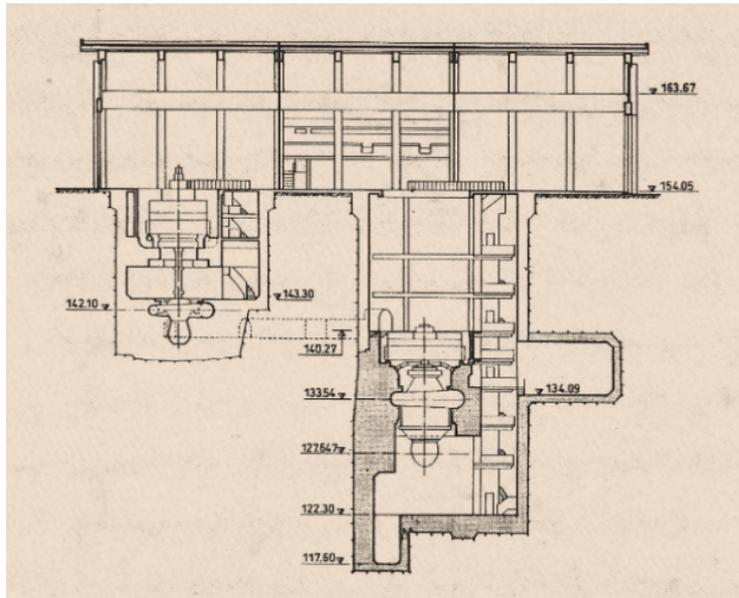


Fig. 19 – Vilarinho das Furnas. Corte transversal pelo eixo dos grupos.

O aproveitamento hidroelétrico do **Torrão** é o primeiro a ser realizado com grupos reversíveis na bacia do Douro e também o primeiro com central em poço associada a circuitos hidráulicos curtos.

A central situa-se na encosta da margem esquerda do rio, cerca de 150 m a jusante da barragem (Figura 20). Está equipada com dois grupos reversíveis, cujos eixos distam 30 m, instalados em poços independentes com cerca de 50 m de altura e de secção circular com diâmetro interior de 17,5 m. Ao nível dos pisos das turbinas e dos alternadores, os dois poços estão ligados entre si por galerias, nas quais se encontra instalado todo o equipamento de arranque, regulação, refrigeração e esgoto (Figura 21).

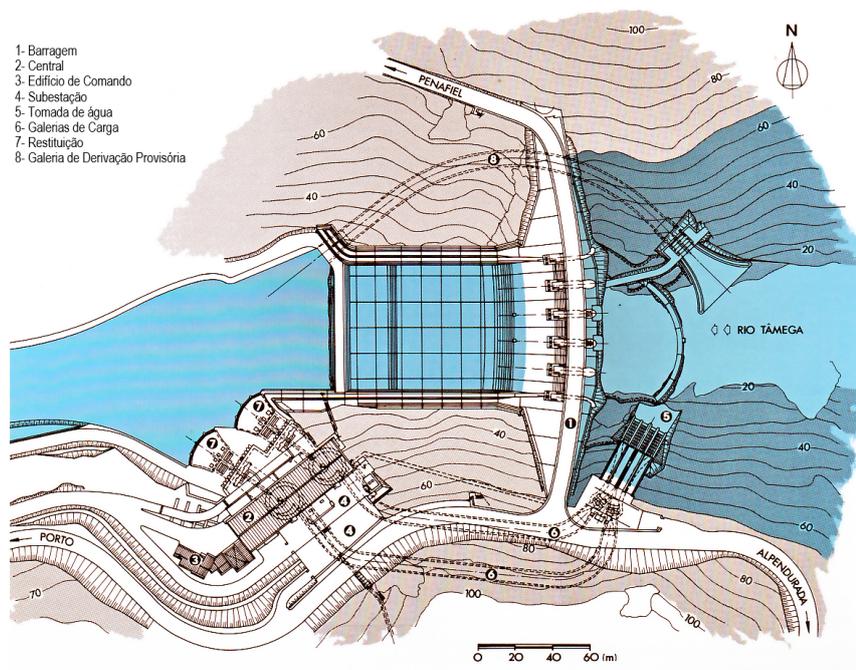


Fig. 20 – Aproveitamento hidroelétrico do Torrão. Planta.

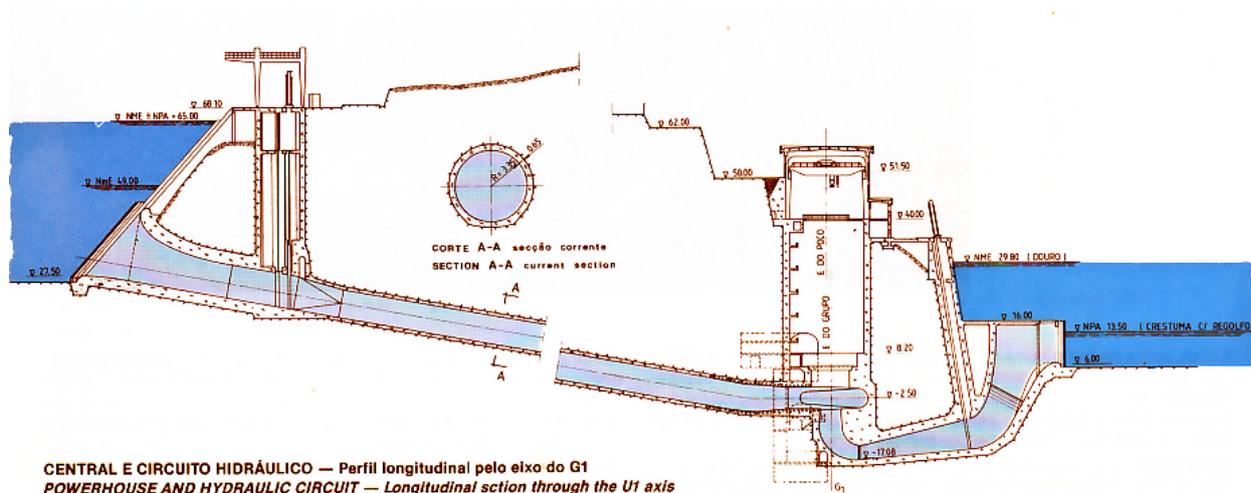


Fig. 21 – Perfil longitudinal pelo circuito hidráulico e central do Torrão.

O aproveitamento tem uma única tomada de água, a partir da qual se desenvolve, para cada grupo, uma galeria em carga e um difusor. A tomada de água (restituição em bombagem) localiza-se um pouco a montante do encontro esquerdo da barragem.

Cerca de 40 m a jusante do bocal, situa-se o poço das comportas onde estão instaladas uma comporta lagarta e uma comporta corrediça por grupo. As duas galerias em carga têm secção circular com 6,70 m de diâmetro interior e uma inclinação de 17,5%. A restituição situa-se na albufeira de Crestuma-Lever.

O aproveitamento hidroelétrico do **Baixo Sabor**, situado no troço inferior do rio Sabor, afluente da margem direita do rio Douro, é constituído por dois escalões, designados por Baixo Sabor e por Feiticeiro, que distam, respetivamente, 3 km e 12,6 km da confluência dos dois rios (EDP Produção, 2019).

Nos dois escalões, as centrais localizam-se na margem direita imediatamente a jusante da barragem. Cada central aloja dois grupos reversíveis que são alimentados por circuitos hidráulicos subterrâneos independentes. A barragem de jusante destina-se a constituir o contraembalse de montante, permitindo regularizar caudais e garantir condições de bombagem adequadas a partir da albufeira da Valeira, no rio Douro (Figura 22).

No **escalão do Baixo Sabor**, cada circuito hidráulico é constituído, de montante para jusante, por: tomada de água (restituição em bombagem), com um bocal e uma torre de manobra de equipamentos hidromecânicos; túnel em carga, composto por dois tramos subhorizontais ligados por um poço inclinado fazendo um ângulo de 60° com a vertical; restituição (Figura 23). Os dois túneis em carga são praticamente paralelos, afastados cerca de 30 m. São revestidos com betão armado, incorporando blindagens em aço, numa extensão de cerca de 55 m junto à central. O diâmetro interno do revestimento circular dos túneis é de 5,70 m em betão armado e de 4,40 m na secção blindada (Sarmiento et al., 2018).

A restituição é composta por dois curtos túneis com 33,8 m de desenvolvimento, com secção transversal circular de 5,70 m de diâmetro interior, e por dois bocais onde se inserem as ranhuras das comportas ensecadeiras e das grades de proteção.

Na conceção da central, foram ponderadas diversas alternativas, incluindo a solução em caverna, tendo-se optado por instalar os dois grupos em poços independentes. As obras subterrâneas da central, para além destes poços, incluem o poço de barramentos e de acesso, as câmaras entre poços e, ainda, as galerias de acesso à central (Figura 24).

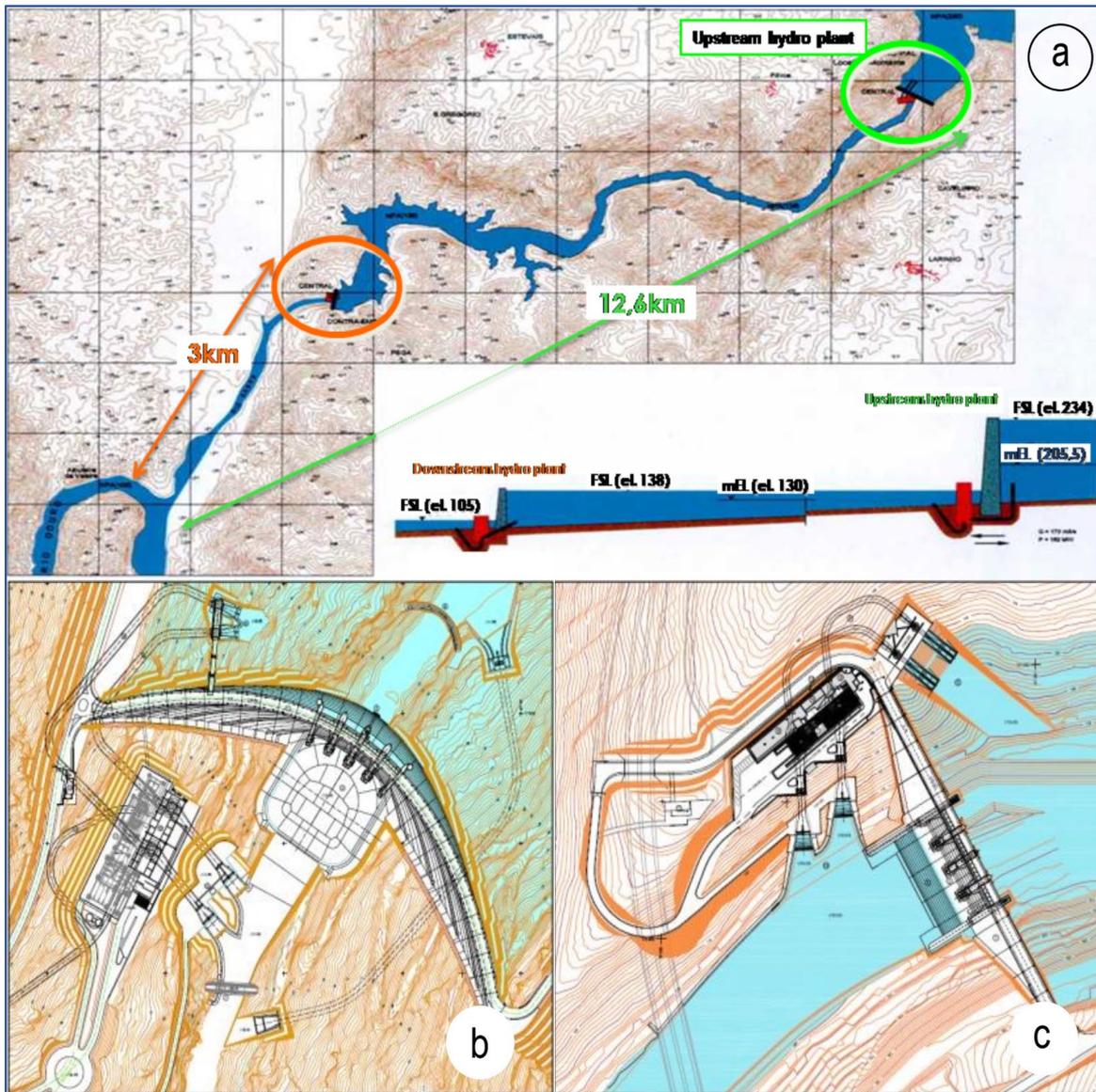


Fig. 22 – Aproveitamento hidroelétrico do Baixo Sabor: a) localização; b) planta do escalão do Baixo Sabor; c) planta do escalão do Feiticeiro.

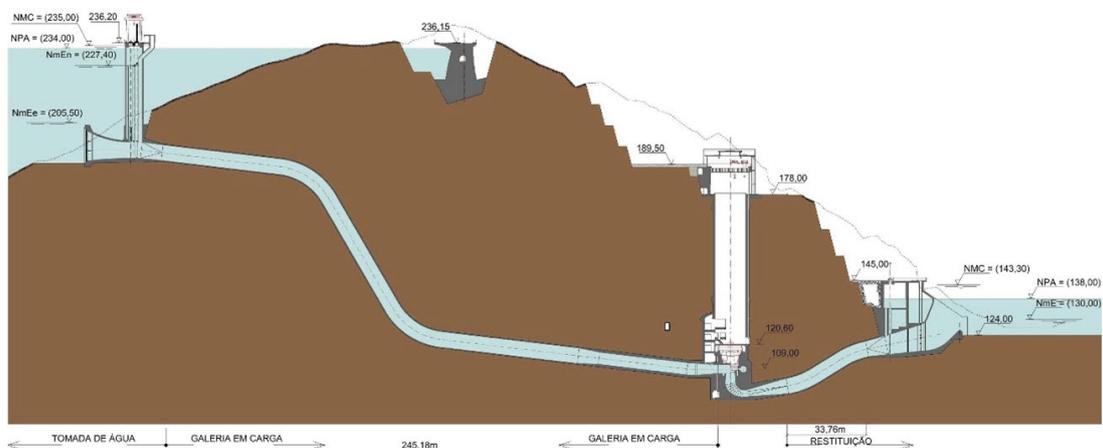


Fig. 23 – Circuito hidráulico e central do escalão de Baixo Sabor. Perfil longitudinal.

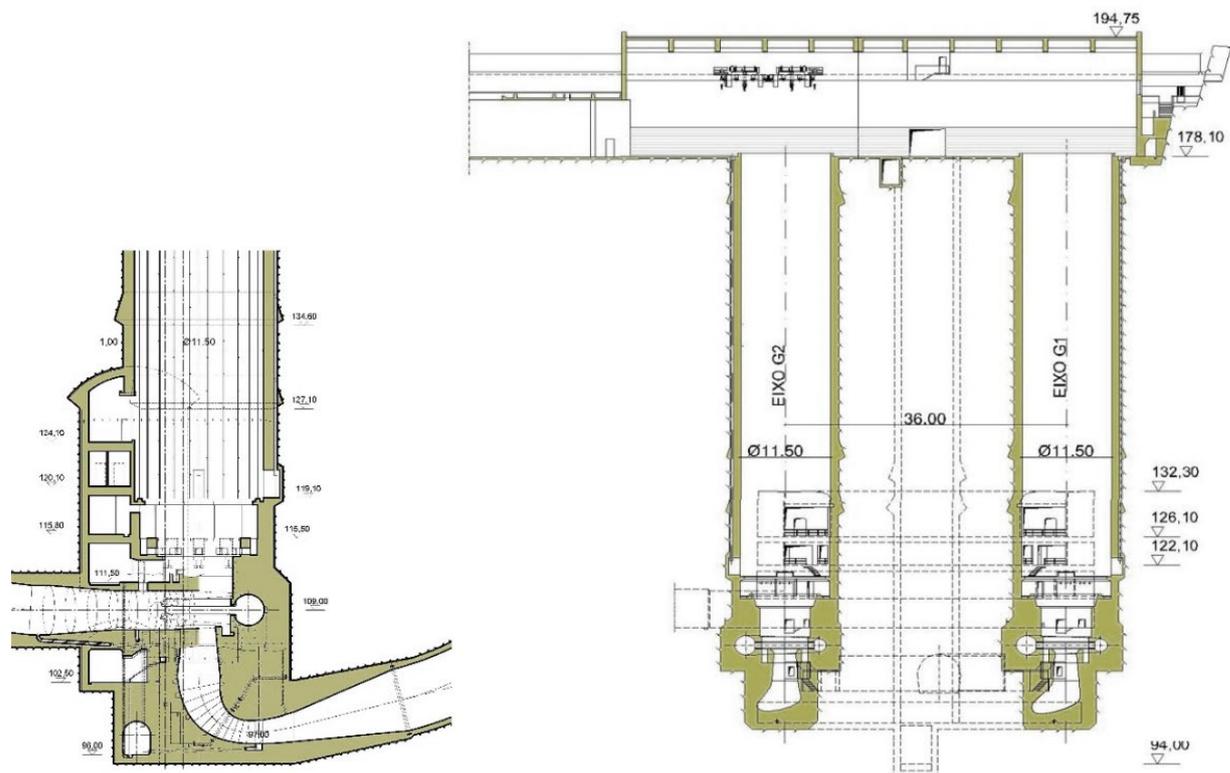


Fig. 24 – Central do escalão de Baixo Sabor. Corte longitudinal (montante-jusante) e transversal pelo eixo dos grupos.

Os poços dos grupos, com cerca de 82 m de altura e 11,5 m de diâmetro, têm os eixos espaçados de 36 m e são revestidos com betão armado. Na sua parte inferior, estes comunicam entre si através de duas câmaras sobrepostas equipadas com vários pisos técnicos para a instalação de equipamentos auxiliares. A câmara superior, com 8,0 m da largura e 18,6 m de altura, comporta o piso da turbina, o piso do alternador e dois pisos das instalações elétricas. Na câmara inferior, com 5,5 m da largura e 5,5 m de altura, destinou-se um piso para a drenagem e outro para alojar o equipamento de desafoamento e proporcionar o acesso aos difusores dos grupos.

O acesso aos pisos técnicos pode fazer-se através do poço de barramentos por ascensor ou por escada. Alguns pisos têm ligação ao exterior através de galerias que permitem o acesso rodoviário. O poço de barramentos é revestido a betão armado, tem 82,1 m de altura, secção transversal retangular de 7,5 m x 6,7 m e localiza-se entre os poços dos grupos.

A complexidade espacial do conjunto das cavidades formado pelos poços e cavernas da central, implantado próximo da encosta que, por sua vez, foi objeto de escavações para inserção do bocal da restituição, levou à elaboração, na fase de projeto, dum modelo numérico tridimensional em que foi simulada uma escavação faseada para permitir avaliar o comportamento do maciço (Figura 25).

No **escalão do Feiticeiro**, os dois circuitos hidráulicos que alimentam os grupos são totalmente independentes, apresentando desenvolvimentos idênticos. Cada tomada de água é constituída por um bocal de adução com dois vãos separados por um septo central, e um troço de galeria retangular com 40 m de extensão até ao poço vertical, de secção circular, para manobra das comportas de serviço e ensecadeira. A jusante do poço, a adução em carga tem um comprimento total de 120 m e secção circular. O troço inicial desta, com 4,80 m de diâmetro interior, é revestido com betão armado, seguindo-se-lhe um troço blindado, com 3,75 m de diâmetro interior e 19,6 m de comprimento, que faz a ligação à espiral do grupo. Cada restituição é composta por uma galeria com 50 m de comprimento, poço vertical para manobra da comporta ensecadeira e pelo bocal junto ao leito do rio (Figura 26).

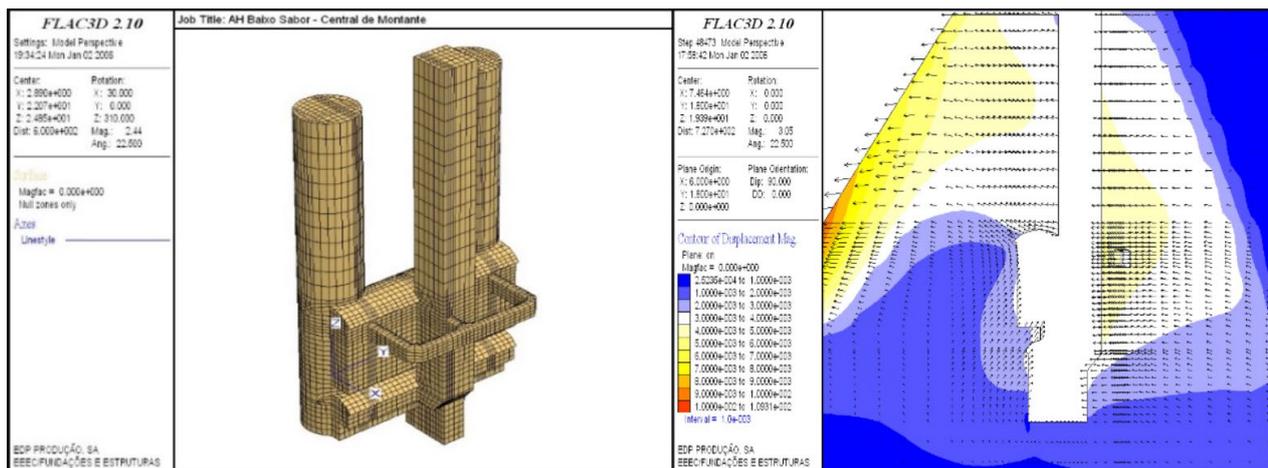


Fig. 25 – Central do escalão de Baixo Sabor. Representação 3D das escavações e isolinhas de deslocamentos num corte transversal intersecando o poço de barramentos.

A central situa-se a jusante da barragem, sendo constituída por um piso de descarga e montagem enterrado, com uma área em planta de 60 m × 16,9 m e uma altura de 15 m, e por dois poços circulares, um por cada grupo reversível, cujo alinhamento se aproxima da orientação do curso do rio. A entrada na central é realizada a partir de uma plataforma exterior.

Abaixo do átrio, a central é composta por dois poços circulares com 22 m de diâmetro interno e 33 m de profundidade, afastados de 40 m entre eixos. Estruturalmente são constituídos por um revestimento em betão armado. Ambos os poços albergam no seu interior pisos técnicos para instalação de equipamento. A determinados níveis, foram executadas galerias horizontais com revestimento em betão armado, que ligam os dois poços permitindo a circulação entre ambos. À cota da soleira dos poços está implantada a galeria de drenagem.



Fig. 26 – Circuito hidráulico e central do Feiticeiro. Perfil longitudinal.

Localizado a cerca de 95 km da nasçença do rio Vouga, **Ribeiradio** é o principal escalão do aproveitamento hidroelétrico que inclui um outro, Ermida, situado cerca de 5 km a jusante. Para além da produção de energia elétrica, o aproveitamento serve para abastecimento de água e controlo de cheias no Baixo Vouga. O escalão de Ermida, com central na continuidade da barragem e equipada com dois grupos (7,6 MW), destina-se ainda à modulação dos caudais de Ribeiradio, evitando variações bruscas de caudal lançado para jusante (EDP Produção, 2019).

A central de Ribeiradio, em poço, está instalada na margem esquerda do rio e possui um grupo gerador. O circuito hidráulico é constituído por: tomada de água dotada de grades, comporta enscadeada e comporta de serviço que funciona como órgão de proteção da turbina; galeria de adução com cerca de 200 metros de comprimento, revestida a betão na secção corrente, com 5,5 metros de diâmetro, e blindada no troço imediatamente a montante da entrada da turbina numa

extensão de cerca de 45 m; restituição composta pelo tubo de aspiração da turbina, que termina em secção retangular, e por galeria equipada, na saída, com comporta corredeira que permite isolar o grupo por jusante (Figura 27).

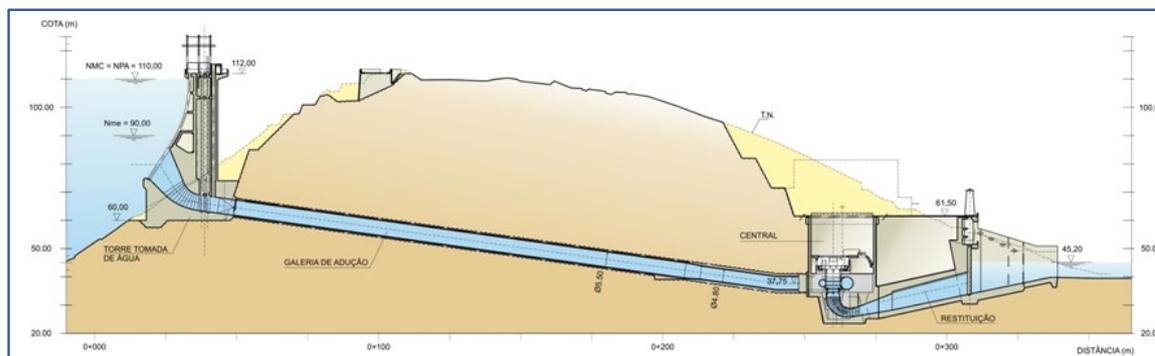


Fig. 27 – Central e circuito hidráulico de Ribeiradio. Perfil longitudinal.

O aproveitamento hidroelétrico de **Foz Tua** localiza-se no rio Tua, afluente da margem direita do rio Douro. Integra uma barragem abóbada, localizada a cerca de 1 km da confluência dos dois rios, e circuitos hidráulicos subterrâneos, que se desenvolvem na margem direita, sendo paralelos e independentes, alimentando cada um dos grupos da central (EDP Produção, 2019).

A tomada de água situa-se cerca de 100 m a montante do encontro direito da barragem, sendo composta por duas estruturas independentes, em torre, onde se alojam as grades e as comportas de segurança atuadas por servomotores. (Figura 28).

Os túneis de adução têm secção interna circular com 7,50 m de diâmetro no troço corrente e 5,50 m na secção com trechos blindados (65,8 / 61,9 metros) localizados imediatamente a montante da central.

A restituição, imediatamente a jusante da central, é constituída por dois túneis independentes de secção retangular variável em largura, cada um incorporando um poço onde está instalada a comporta ensecadeira, manobrada por servomotores, que garante a proteção, por jusante, do grupo e a inspeção do túnel.

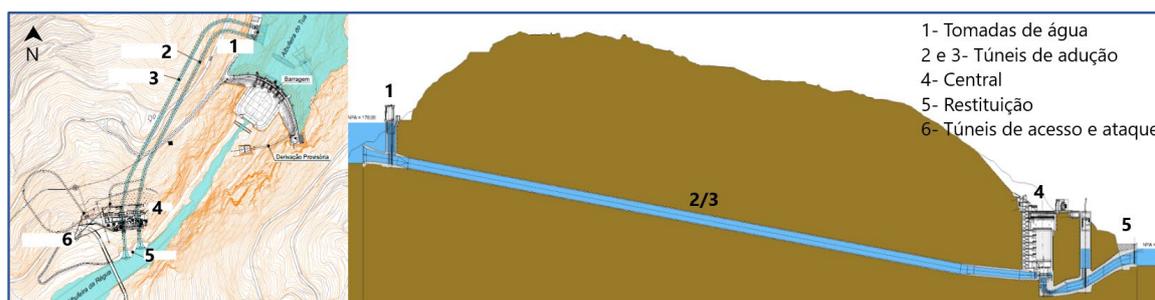


Fig. 28 – Central e circuito hidráulico de Foz Tua. Perfil longitudinal.

A central foi implantada cerca de 500 metros a jusante da barragem. A sua localização no Alto Douro Vinhateiro, área classificada pela UNESCO como Património Mundial na categoria de Paisagem Cultural Evolutiva e Viva, originou uma significativa alteração do seu projeto inicial, com substituição da solução do edifício de apoio e descarga à superfície por uma solução em que o átrio de descarga passou a ser enterrado e o edifício de apoio com uma cobertura vegetal para melhorar a sua integração na encosta (Figura 29).

Assim, a central é constituída por dois poços com um diâmetro interior de 16,10 m e uma altura máxima de 51 m, unidos superiormente pelo átrio de descarga e montagem, enterrado, situado 15 m abaixo da superfície. Os poços desenvolvem-se abaixo do átrio e incluem um conjunto de pisos

técnicos destinados a albergar equipamentos, encontrando-se interligados, a uma cota intermédia, por uma galeria que é utilizada para passagem do barramento de arranque. Adicionalmente, os poços têm ligação à galeria do piso da turbina, à galeria do piso do desafogamento e ao piso de drenagem.

O acesso ao interior da central é efetuado, em cada um dos poços, a partir do edifício de apoio, localizado na plataforma exterior, através de uma caixa de escadas e de um elevador e, ainda, através de um túnel de acesso com cerca de 518 m de comprimento, com início na referida plataforma e fim no piso do desafogamento.

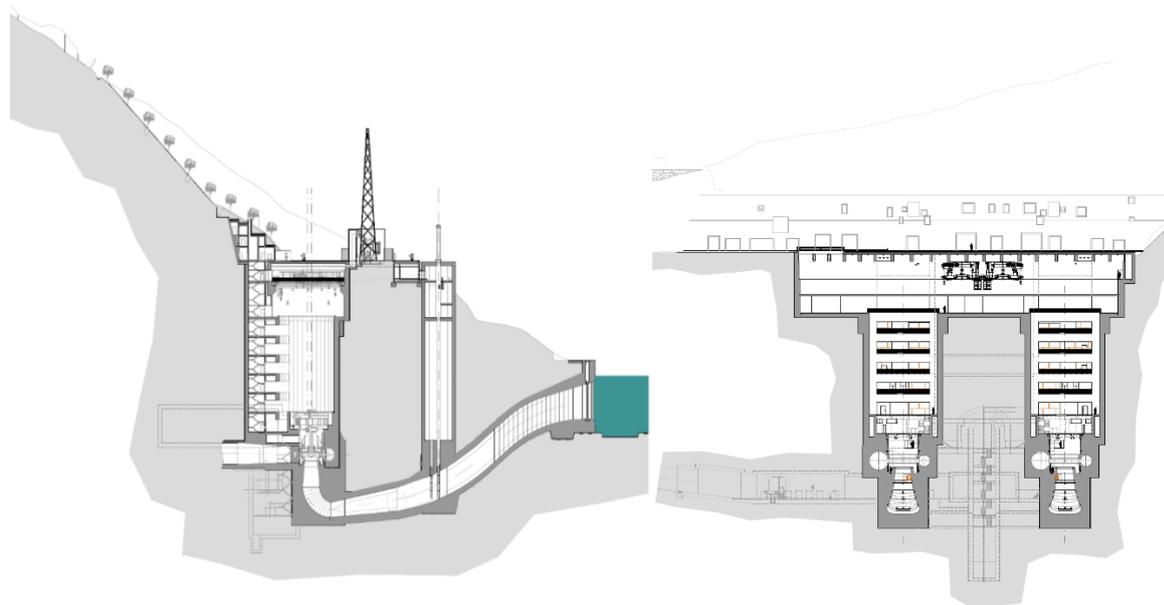


Fig. 29 – Central de Foz Tua. Cortes transversal e longitudinal.

4.2.2 – Reforços de potência

No troço internacional do rio Douro atribuído a Portugal, foram inicialmente construídos os aproveitamentos de Picote, Miranda e Bemposta, todos com central em caverna (vide capítulo 4.3.1). Visando colocar fim ao desaproveitamento de energia e reduzir os condicionamentos resultantes das condições de exploração do aproveitamento hidroelétrico de Castro, em Espanha, imediatamente a montante de Miranda, foram realizados os reforços de potência daqueles três aproveitamentos, sendo em poço as centrais de Miranda II e de Bemposta II e em caverna a central de Picote II.

No projeto do reforço de Miranda, **Miranda II**, tirou-se partido das particularidades que caracterizavam o escalão inicial. Assim, o túnel que servira para desvio do rio e depois convertido em descarga auxiliar durante a construção da barragem foi aproveitado para circuito hidráulico do novo grupo, passando as funções de regulação automática de nível que desempenhava a ser cumpridas pelo descarregador principal, tirando partido do sistema automático instalado em duas comportas. A existência de uma plataforma junto à parte terminal desse túnel, servida por estrada, foi fator decisivo para a implantação e conceção da nova central (EDP, 2011b).

O circuito hidráulico tem uma tomada de água dividida por um septo central, sendo cada uma das secções resultantes protegida com grades metálicas. Para isolamento do circuito hidráulico e proteção do grupo, dispõe de duas comportas automáticas de segurança, podendo a montante ser colocada uma comporta ensecadeira. A galeria em carga, com um diâmetro interior de 9,70 m, é revestida com betão até uma secção intermédia do troço inclinado e blindada com chapa de aço em toda a restante extensão. O difusor está equipado com uma comporta ensecadeira, fazendo-se a restituição das águas turbinadas por uma curta galeria inclinada, com o teto em abóbada (Figura 30).

A central está parcialmente enterrada no poço, que tem uma secção circular com 24,5 m de diâmetro e 66 m de altura. A movimentação das cargas é assegurada por um semi-pórtico e por uma

ponte rolante. Reduziu-se ao mínimo a intervenção no terreno, evitando novos impactos visuais numa zona já muito alterada aquando do primeiro aproveitamento.

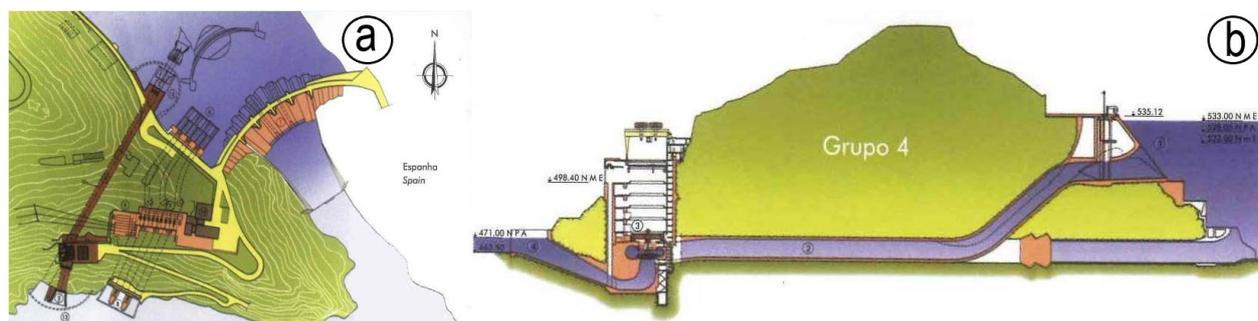


Fig. 30 – Aproveitamento hidroelétrico de Miranda: a) Planta geral (Miranda I e Miranda II); b) Perfil longitudinal da central e circuito hidráulico de Miranda II.

A conceção do reforço de potência de Bemposta, designado por **Bemposta II** (Figura 31), foi condicionada pela implantação dos elementos do aproveitamento pré-existente, procurando otimizar diferentes objetivos, designadamente: i) aproximar, tanto quanto possível, a central e a restituição da estrutura de saída de Bemposta I, de modo a encurtar o circuito hidráulico, garantindo um afastamento seguro e confortável do circuito em relação à central existente e com suficiente cobertura lateral das estruturas subterrâneas em relação ao leito do rio; ii) tirar partido da existência de locais já intervencionados com topografia propícia ao estabelecimento das plataformas da central e subestação e consequente minimização dos impactos visuais resultantes, garantindo o acesso às duas plataformas apenas à custa da retificação dos acessos existentes; iii) aproveitar as galerias de ataque às obras subterrâneas executadas no âmbito da construção de Bemposta I para realizar, à custa de reperfilamentos e da abertura de dois pequenos ramais, não só o ataque ao novo circuito hidráulico, mas também a retirada do escombro resultante da escavação do poço da central (EDP Produção, 2019).

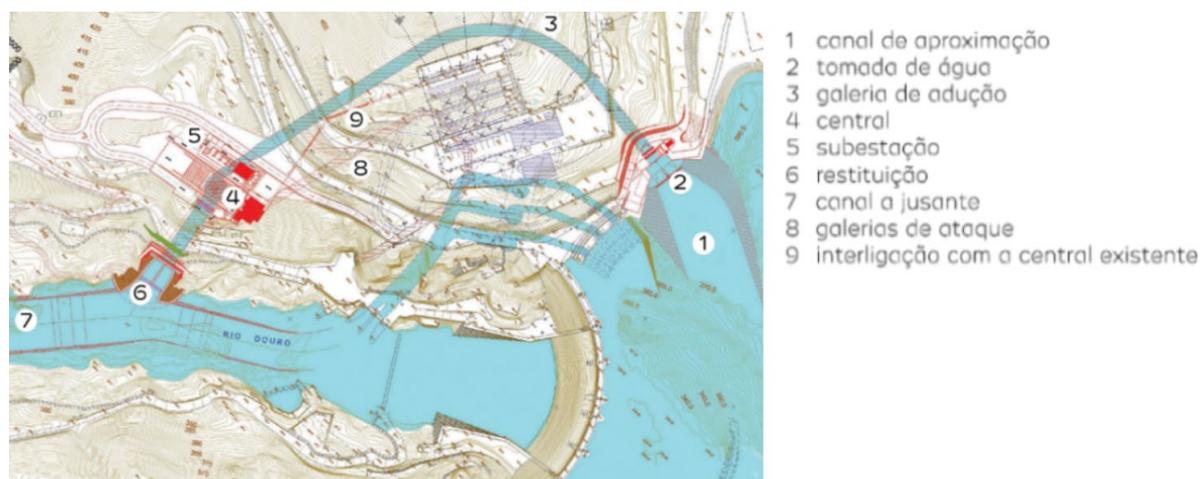


Fig. 31 – Bemposta II. Planta geral.

O reforço de potência é fundamentalmente constituído por um circuito hidráulico subterrâneo, inserido na margem direita, dotado de: tomada de água composta por um bocal e uma estrutura destinada ao abrigo e manobra das comportas; adução constituída por um extenso trecho, com 14,2% de inclinação e 10,5 m de diâmetro interior, revestido com betão armado, e por um trecho blindado, sub-horizontal, até à entrada da espiral do grupo, com 8,5 m de diâmetro e 38 m de comprimento;

restituição constituída por um curto alinhamento reto com secção variável ligando o tubo de aspiração do grupo ao bocal de restituição, que se prolonga por uma estrutura de transição até ao rio (Figura 32).

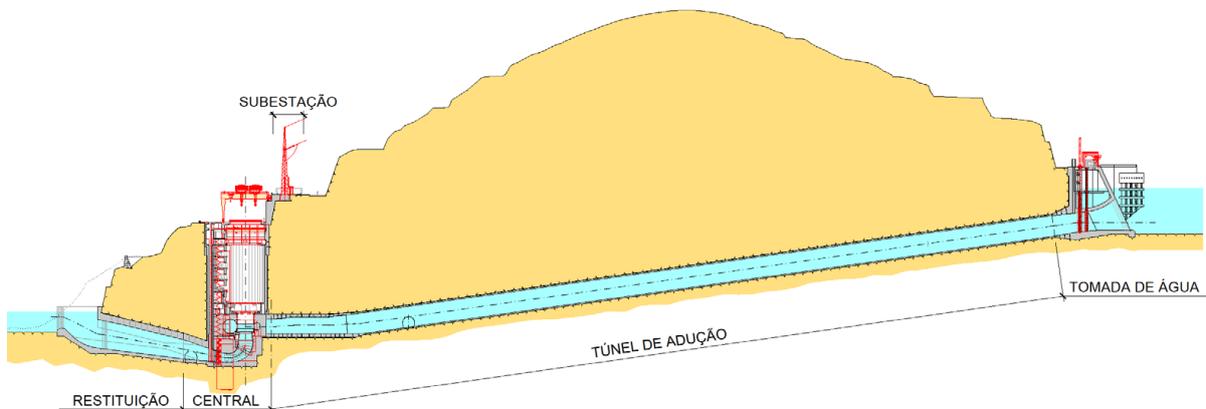


Fig. 32 – Bemposta II. Central e circuito hidráulico. Perfil longitudinal.

A central está inserida num poço com cerca de 60 m de profundidade. O poço desenvolve-se a partir do átrio de montagem e a sua secção tem a forma circular, com 19 m de diâmetro interior, acrescida de um alargamento do lado de jusante, por forma a viabilizar a inserção das ranhuras (com um septo central) que permitiu a inserção das ranhuras das duas comportas ensecadeiras, do tipo corrediça, do tubo de aspiração. No alargamento inscreve-se ainda a caixa de escadas e o elevador, assim como a passagem dos barramentos, cabos e tubagens diversas. Permitiu ainda a criação de pisos técnicos, ao longo do poço, nos quais estão localizados os equipamentos auxiliares do grupo (Figura 33).

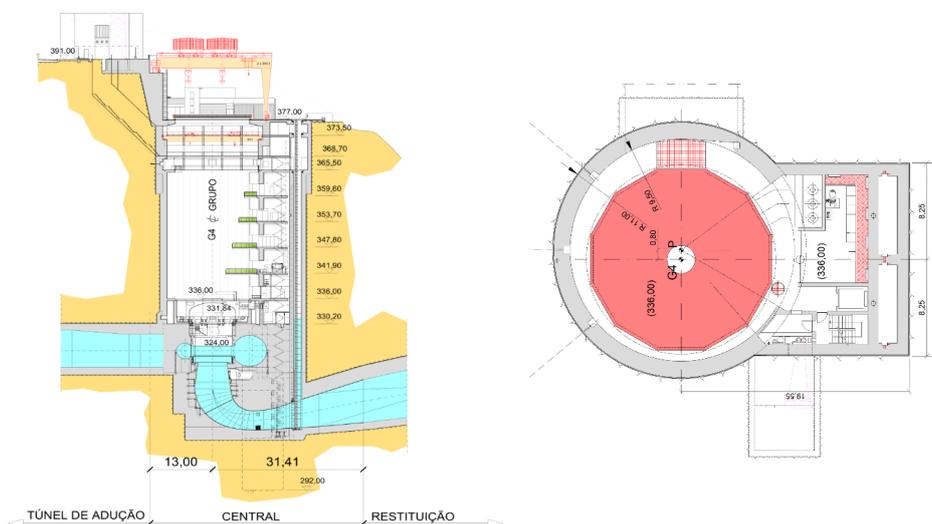


Fig. 33 – Bemposta II. Central. Corte transversal e secção corrente do poço (piso técnico tipo).

Na parte inferior do poço da central, foram também previstas áreas suplementares para implantação de equipamentos, da espiral e da blindagem do tubo de aspiração, e para a materialização do poço de esgoto e drenagem da instalação.

Toda a conceção da central foi desenvolvida com o objetivo de otimizar o seu prazo de execução, criando várias frentes de trabalho ao ar livre e subterrâneas, tornando-as independentes, de modo a permitir o início da montagem dos componentes do grupo o mais cedo possível e sem

interferir com o crescimento dos betões estruturais do átrio e do poço. O faseamento construtivo previu a instalação dos equipamentos de elevação - semi-pórtico exterior e ponte rolante do átrio - com antecedência, de modo a permitir a sua utilização na montagem das peças mais pesadas do grupo.

Uma vez executadas as escavações das plataformas exteriores e da parte enterrada do átrio de descarga e montagem, escavaram-se sensivelmente 5 m de altura de poço em secção plena. Após a abertura com *raise-boring* do furo piloto inicial e, de modo a permitir a prossecução das escavações do poço de uma forma segura, procedeu-se à execução de um pré-anel em betão armado no contorno e na altura da secção escavada com, sensivelmente, 1 m de espessura.

Em simultâneo, iniciou-se a execução dos betões das paredes do átrio de descarga e montagem, assim como do muro superior entre as duas plataformas exteriores que inclui o caminho de rolamento superior do semi-pórtico rolante. As escavações do poço prosseguiram em alturas de, aproximadamente, 6 m, com aplicação imediata de drenagem e contenção da rocha escavada.

Atingida a cota de instalação da turbina, iniciou-se a construção, de baixo para cima, dos principais elementos estruturais em betão armado, suspensos no maciço rochoso ao longo do contorno escavado, através das pregagens realizadas aquando das escavações, dimensionadas para o efeito.

Os betões avançaram de modo contínuo, permitindo gradualmente o fecho estrutural da central, acima da cota a que os mesmos tinham iniciado, e a conclusão dos caminhos de rolamento dos equipamentos de elevação. Nas cotas inferiores, foram concluídos os trabalhos de escavação e iniciaram-se as montagens dos componentes do grupo intercaladas com os betões de envolvimento.

A montagem do poço da turbina e seu envolvimento em betão, incluindo a materialização dos negativos para apoio do estator, antecederam o fecho estrutural do poço, através da realização da última betonagem do seu revestimento até à cota a que os betões iniciais tinham arrancado.

4.3 – Aproveitamentos com central em caverna

As centrais em caverna, para além facultarem um eficaz abrigo (dos equipamentos) contra as cheias, proporcionam uma maior liberdade na sua implantação e permitem, em grande medida, a sua execução independente dos trabalhos da barragem e derivação provisória das águas.

O layout dum aproveitamento hidroelétrico com central em caverna inclui, no geral, grande volume e diversidade de obras subterrâneas. Parte destas obras reporta ao circuito hidráulico, subdivididas pela adução e restituição, nas quais se incorporam as tomadas de água e chaminés de equilíbrio, outra parte é relativa ao complexo da central, do qual sobressai a caverna onde ficam instalados os grupos geradores. A estas há que adicionar outros espaços escavados para alojar equipamentos mecânico e elétrico, fundamentais na produção e transporte de energia, e para acessos, ventilação e segurança, elementos fundamentais na fase de exploração do empreendimento. Durante a construção, são também escavados túneis e poços de utilização temporária utilizados para aceder e atacar a escavação das obras principais.

Em Portugal, no presente, são doze as centrais em serviço instaladas em caverna: uma no rio Lima, seis na bacia Cávado-Rabagão, quatro no Douro internacional e uma no rio Távora, afluente do Douro (Plasencia, 2014). A sua realização processou-se em dois períodos temporais, o primeiro decorrido na década de 50 e até meados da década de 60 do século passado (Quadro 5), iniciando-se o segundo período, cerca de um quarto de século após o termo do primeiro, com o empreendimento do Alto Lindoso (Quadro 6). As centrais do primeiro período foram realizadas pela HICA, na bacia do Cávado-Rabagão, e pela HED, na bacia do Douro, enquanto as do segundo período respeitam a empreendimentos realizados sob a égide da EDP.

Para aproveitamento da queda de cada escalão, são especialmente relevantes os estudos hidráulicos que estão na base da configuração e dimensionamento do circuito hidráulico. Deste ponto de vista, constata-se que as centrais do Douro Internacional são caracterizadas por circuitos

hidráulicos curtos, sem chaminé de equilíbrio, enquanto as restantes possuem circuitos hidráulicos longos que implicaram a realização de chaminés de equilíbrio.

Quadro 5 – Centrais em caverna das décadas 1950-1960

Aproveitamento hidroelétrico	Central				Adução	Restituição
	Potência instalada (MW)	Número de grupos	Queda bruta máx / min (m)	Caudal máximo turbinável (m ³ /s)	L (m)	L (m)
Salamonde	42	2	125 / 78	2 x 22	128	1 879
Caniçada	62	2	121 / 77	2 x 34	190	7 500
Alto Rabagão	68	2 (*)	60 / 40	2 x 26	500	6 000
Miranda	180	3	66 / 51	3 x 128	87	292
Picote	195	3	74 / 63	3 x 117	91	100
Bemposta	240	3	71 / 59	3 x 152	74	185
Vilar-Tabuaço	58	2	461 / 432,5	2 x 9	15619	1966

L - comprimento (valores médios nos casos de Miranda, Picote e Bemposta); (*) - grupos equipados com bombagem.

Quadro 6 – Centrais em caverna pós 1990

Aproveitamento hidroelétrico	Central				Adução	Restituição
	Potência instalada (MW)	Número de grupos	Queda bruta máx / min (m)	Caudal máximo turbinável (m ³ /s)	L (m)	L (m)
Alto Lindoso	630	2	288 / 227	125	478	4 883
Venda Nova II	191	2 - R	422 / 400	51	1 400	2 800
Picote II	246	1	66,6 (*)	400	300	150
Venda Nova III	780	2 - R	414,1 (*)	200	2 840	1 380
Salamonde II	224	1 - R	115,1 (*)	207,2	200	1 910

L - comprimento; R - reversível; (*) - valores de queda útil

Em relação aos últimos, distinguem-se três situações definidas em função dos comprimentos relativos da adução versus restituição: a primeira, da qual a central de Vilar Tabuaço é exemplo singular, caracteriza-se por uma adução longa, dotada de chaminé de equilíbrio e uma restituição de menor comprimento, cujo funcionamento hidráulico dispensa a chaminé de equilíbrio; a segunda, na qual se incluem os aproveitamentos de Alto Lindoso no rio Lima, e de Alto Rabagão, Salamonde I, Salamonde II e Caniçada na bacia Cávado-Rabagão, caracteriza-se por o circuito hidráulico possuir a adução curta e a restituição longa dotada de chaminé de equilíbrio; e a terceira, de que são

exemplos os reforços de potência de Venda Nova II e Venda Nova III, caracteriza-se por adução e restituição longas, ambas com chaminé de equilíbrio.

Nos pontos seguintes, serão abordados aspetos relativos às centrais agrupadas em função das configurações aqui sumariamente referidas.

4.3.1 – Centrais com circuitos hidráulicos curtos

O primeiro aproveitamento realizado no troço internacional atribuído a Portugal foi o escalão de Picote, seguindo-se-lhe Miranda e Bemposta, cada um dotado de três grupos comportas (EDP, 1986). Posteriormente, no segundo período referido no ponto anterior, foram realizados reforços de potência nestes escalões, todos dotados de um grupo, sendo o de Picote II o único com central em caverna (Figura 34a) (EDP Produção, 2019).

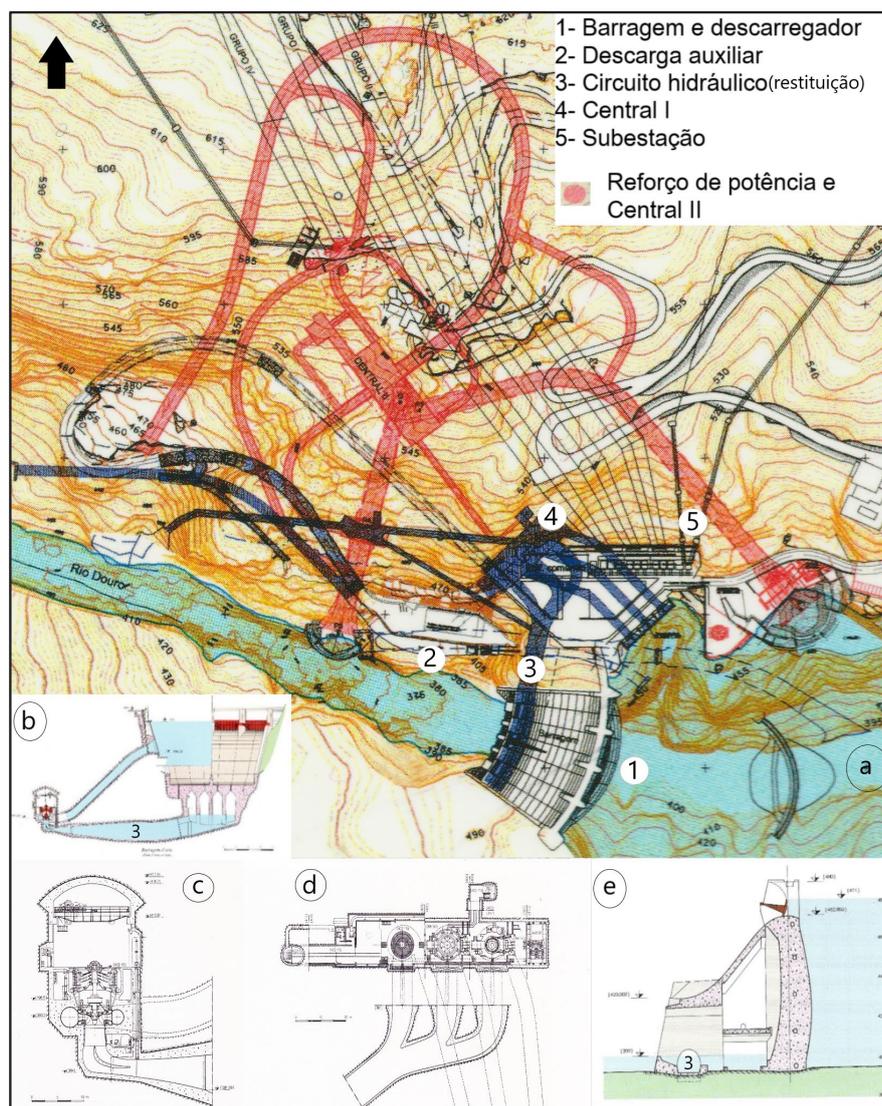


Fig. 34 – Aproveitamento hidroelétrico de Picote; a) planta geral (Picote I e Picote II); b), c), d), e) elementos do circuito hidráulico e central de Picote I.

A barragem de **Picote** fica localizada numa formação granítica, em vale muito encaixado, com fundo à cota (400) e margens muito íngremes, principalmente abaixo da cota (475). A barragem é do tipo abóbada, com 92,3 m de corda no coroamento, entre encontros, e 100 m de altura máxima acima da fundação. O descarregador sobre a barragem tem 4 vãos, providos de comportas (EDP,

1986). Imediatamente a jusante da barragem, mas estruturalmente desligados desta, contrafortes de cabeças encostadas formam uma soleira-descarregador e um trampolim de lançamento, constituindo um salto de ski (Figura 34a e 34e).

A caverna da central de Picote tem um comprimento total de 88 m e vão de 16,6 m entre hasteais, tendo a altura máxima de escavação atingido 35 m. A abóbada é revestida por um arco de betão simples, de espessura variável e com 1,2 m no fecho, apoiado em entalhes no maciço rochoso escavados na parte superior dos hasteais (Nunes, 1961). Estruturalmente suspensas da abóbada, na zona das nascenças, betonaram-se duas vigas parede com banzo inferior alargado, o qual serve de apoio dos caminhos de rolamento das pontes rolantes (Figura 34c).

Nos hasteais, foram executadas pregagens na zona imediatamente subjacente a estas vigas. No lado de montante, a pregagem alargou-se a toda a altura da parede por, paralelamente a esta, ocorrerem falhas a cerca de 6 m da face (Azevedo e Martins, 1961). No âmbito do arranjo arquitetónico do espaço interior, foram construídas paredes separadas por um corredor das superfícies escavadas, o que possibilita a observação do maciço rochoso.

O circuito hidráulico desenvolve-se na margem direita, correspondendo a cada grupo uma tomada de água e adução em carga independente. Cada tomada de água é provida de grades móveis e comportas do tipo lagarta, que são os órgãos de proteção do circuito de adução e das turbinas. As aduções, estabelecidas em galerias inclinadas, têm um diâmetro interior de 5,50 m e são revestidas com betão. No troço inferior com 63 m de comprimento, além de betão, é reforçado com blindagem metálica (Figura 34a e 34b).

Alguns metros após a central, os três tubos de aspiração, providos de comportas do tipo lagarta que servem para visita da turbina e para proteção da central, convergem numa galeria de fuga única, com 15 m de altura e 12 m de largura (EDP, 2008), que restitui as águas turbinadas, sob o trampolim do descarregador de cheias (Figura 34d e 34e).

O acesso à central é feito por dois poços dotados de ascensores e escadas (Figura 35). Um deles, com a boca no interior do edifício de descarga, tem a profundidade de 35 m e uma secção que permite a movimentação do equipamento da central. O outro poço, com altura de 78 m, estabelece comunicação direta entre a central e o edifício de comando. Nele encontram-se instalados os barramentos de ligação dos grupos aos transformadores, e os cabos de comando e sinalização.

As configurações das centrais e circuitos hidráulicos dos aproveitamentos de Miranda e Bemposta, naturalmente dimensionados em função das características específicas dos locais de implantação, refletem aspetos que, em parte, resultam do experienciado na execução do escalão de Picote.

O aproveitamento de **Miranda** foi implantado numa zona onde o curso de água muda bruscamente de direção, formando uma curva fechada (Figura 36). Tal permitiu que o circuito hidráulico a montante e a jusante da central ficasse no mesmo alinhamento, com a boca da restituição afastada da zona de dissipação de energia das cheias uma vez que a barragem foi implantada antes da curva. Por cada grupo, estabeleceu-se um circuito hidráulico independente que inclui tomada de água, conduta forçada, tubo de aspiração e galeria de fuga. As bocas das tomadas de água, adaptadas ao perfil da encosta, são providas de grades móveis de proteção e comportas do tipo lagarta, sendo estas últimas dispostas em poços verticais. As comportas de proteção dos tubos de aspiração foram instaladas em galeria disposta paralelamente à central. As galerias de fuga, com secção em forma de ferradura com 9 m de diâmetro característico útil, são independentes (EDP, 1986).

A caverna da central de Miranda, com um comprimento total de 80 m, largura de 19,6 m e altura máxima de 42,7 m, foi escavada numa formação geológica complexa, essencialmente constituída por migmatitos, micaxistos e veios de quartzo. A abóbada é revestida por um arco parabólico de betão dimensionado para dirigir os impulsos descarregados nas nascenças para o interior do maciço rochoso. Para reforço do seu apoio, foram construídos três pares de pilares, betonados em poços escavados em antecipação à escavação geral do núcleo da caverna, contraventados inferiormente por uma viga que os liga. Posteriormente à escavação, foram betonadas as paredes, em contacto com a rocha, que acabaram ligadas à abóbada. As vigas de suporte do caminho de rolamentos da ponte

rolante foram apoiadas em pilares, portanto não suspensas da abóbada como em Picote (Nunes, 1961).

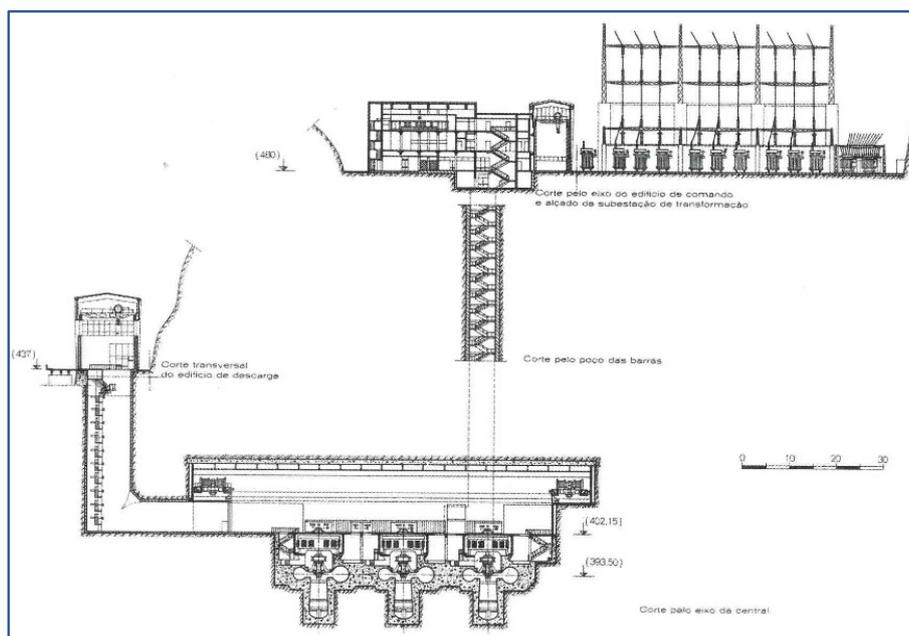


Fig. 35 – Central de Picote. Cortes – eixo da central, poços de acesso e edifício de comando.

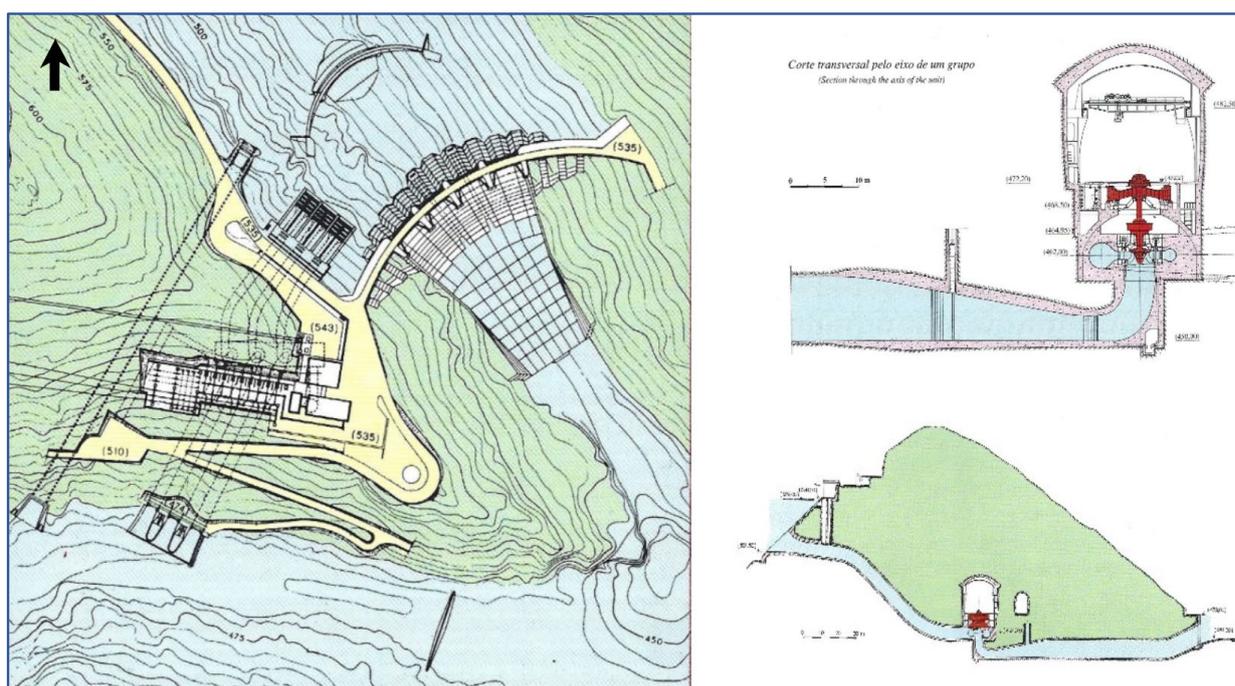


Fig. 36 – Aproveitamento hidroelétrico de Miranda (Miranda I). Planta geral, corte pelo eixo de um grupo e perfil pelo circuito hidráulico.

O edifício de comando, localizado na margem direita, junto do coroamento da barragem, onde se encontra também o edifício de descarga, comunica com a central através de um poço de acesso com cerca de 63 m de profundidade e 9 m de diâmetro.

No aproveitamento de **Bemposta**, a barragem foi implantada num local onde as margens são acentuadamente abruptas, dando ao perfil transversal do rio a configuração de um U com uma base

larga, numa zona em que o maciço é constituído, fundamentalmente, por rochas migmatíticas e granitos (Figura 37). A central em caverna, foi localizada em local que assegurasse uma eficaz proteção quanto à considerável subida das águas do rio, por ocasião das grandes cheias. A restituição das águas turbinadas faz-se por uma galeria de fuga única, com 14,8 m de largura e 16,8 m de altura, e com saída a jusante da bacia de dissipação (EDP, 1986).

A fixação da orientação do eixo longitudinal da central foi condicionada pelas direções da xistosidade e das fraturas dominantes. Esta mesma orientação foi igualmente condicionada pela necessidade de uma saída normal ao eixo da central das condutas de aspiração, de modo a permitir a localização das comportas ensecadeira das turbinas na caverna e um menor desenvolvimento das galerias de fuga.

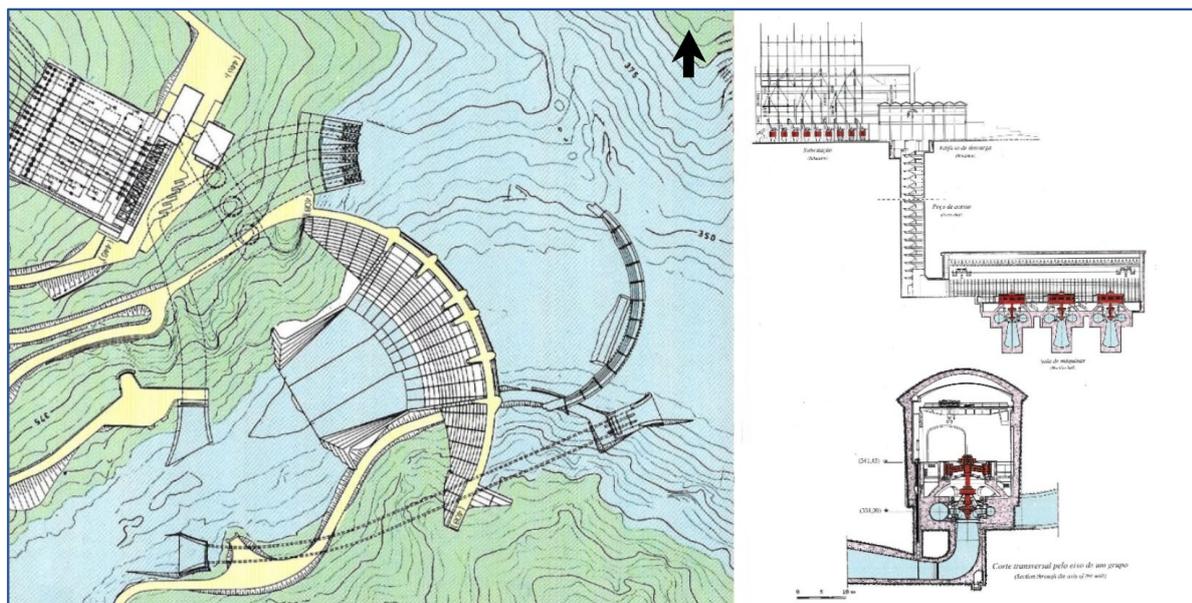


Fig. 37 – Aproveitamento hidroelétrico de Bemposta (Bemposta I). Planta geral e cortes da central.

A caverna da central tem 85 m de comprimento total, 22 m de largura e cerca de 45 m de altura máxima. A abóbada, à semelhança da central de Miranda, é revestida por um arco parabólico de betão apoiado no maciço e, também, em pilares executados em poços escavados em antecipação à escavação geral do núcleo da caverna, posteriormente incorporados nas paredes de betão que revestem a central.

O acesso à central é feito através de um poço com 105 m de altura e 9,5 m de diâmetro, onde estão instalados o ascensor de serviço, a escada, os barramentos de saída da energia e os cabos de baixa tensão que ligam a central com o edifício de comando, este localizado em zona sobrelevada relativamente ao coroamento da barragem. O edifício de descarga, situado em frente ao edifício de comando, abrange a boca do poço de acesso à central, o átrio de descarga, principalmente destinado à manobra do equipamento pesado para a central, e a oficina dos transformadores.

A conceção do reforço de potência de Picote, designado por **Picote II** (Figs. 34a e 38), foi naturalmente condicionado pela presença dos elementos do aproveitamento pré-existente – barragem, central, circuitos hidráulicos e albufeiras – e também pela geomorfologia da zona onde se encontram implantados (EDP Produção, 2019).

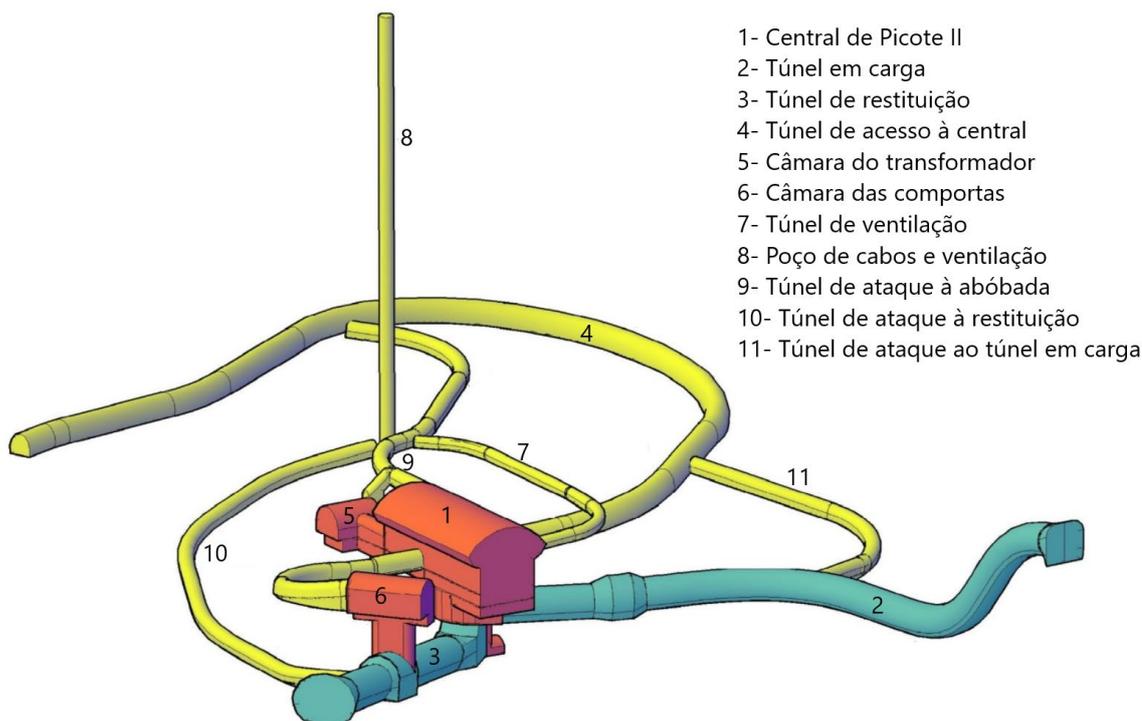


Fig. 38 – Picote II. Representação em perspectiva das obras subterrâneas.

O traçado do circuito hidráulico, necessariamente implantado na margem direita, foi definido de forma a contornar as obras existentes pelo interior do maciço.

A localização da central resultou, essencialmente, da ponderação dos seguintes fatores: *i*) o afastamento da nova central em relação à central existente, de modo a viabilizar a realização das escavações sem riscos significativos que pusessem em causa o normal funcionamento dos equipamentos desta durante a construção de Picote II; *ii*) a garantia de uma cobertura lateral da abóbada da caverna em relação à superfície da encosta; *iii*) os condicionamentos determinados pela existência das galerias de ataque às obras subterrâneas e acessos edificadas no âmbito da construção e exploração do aproveitamento existente. Por sua vez, para a orientação da caverna da central foram relevantes, para além da adequação das inserções dos circuitos de adução e de restituição, as características do maciço rochoso com destaque para a orientação das descontinuidades, o estado de tensão *in situ* e valores dos parâmetros de resistência e de deformabilidade. Da conjugação dos fatores referidos, resultou uma solução em que a nova central tem um afastamento mínimo de 85 m em relação à existente e uma orientação quase perpendicular a esta.

A tomada de água, localizada cerca de 120 m do encontro direito da barragem e a montante da tomada de água do aproveitamento existente, foi equipada com grades e comportas de segurança que são manobradas por equipamento instalado em plataforma situada acima do bocal da tomada de água. Foi construída ao abrigo duma ensecadeira de betão, do tipo abóbada delgada, com 35 m de altura máxima e 82 m de desenvolvimento no coroamento.

A galeria de adução tem cerca de 300 m de comprimento, dos quais os 260 m iniciais são revestidos por um anel de betão armado com 10,70 m de diâmetro interior e 0,65 m de espessura, sendo o restante blindado até à entrada da espiral da turbina. A zona blindada inclui um troço cónico de transição para um diâmetro de 9,00 m, um troço circular de 20 m de extensão com aquele diâmetro e um troço final de transição para a ligação à espiral, onde o diâmetro é de 7,40 m (Figura 39).

A restituição faz-se através dum bocal implantado cerca de 120 m a jusante da barragem. Implicou também a construção duma ensecadeira do tipo abóbada, com uma altura máxima de 29 m e um desenvolvimento de 50 m ao nível do coroamento.

A galeria de restituição tem uma extensão total de aproximadamente 150 m. Em cerca de metade deste comprimento, a secção é circular, com um diâmetro interior de 11,3 m. Os restantes troços correspondem a transições de secção variável: o inicial, que inclui o difusor e uma transição em betão para aquela secção circular; o final, junto ao bocal da restituição, que inclui uma transição quadrado-redondo e um septo vertical em betão armado que subdivide a secção em duas partes; o intermédio, também com um septo de betão, que criou as condições para a instalação de duas comportas ensecadeira que permitem o isolamento do grupo por jusante. Estas, com secção de 4,20 m de largura por 10,60 m de altura, são acionadas por servomotores instalados na caverna designada por câmara das comportas, acedida por uma galeria a partir da central.

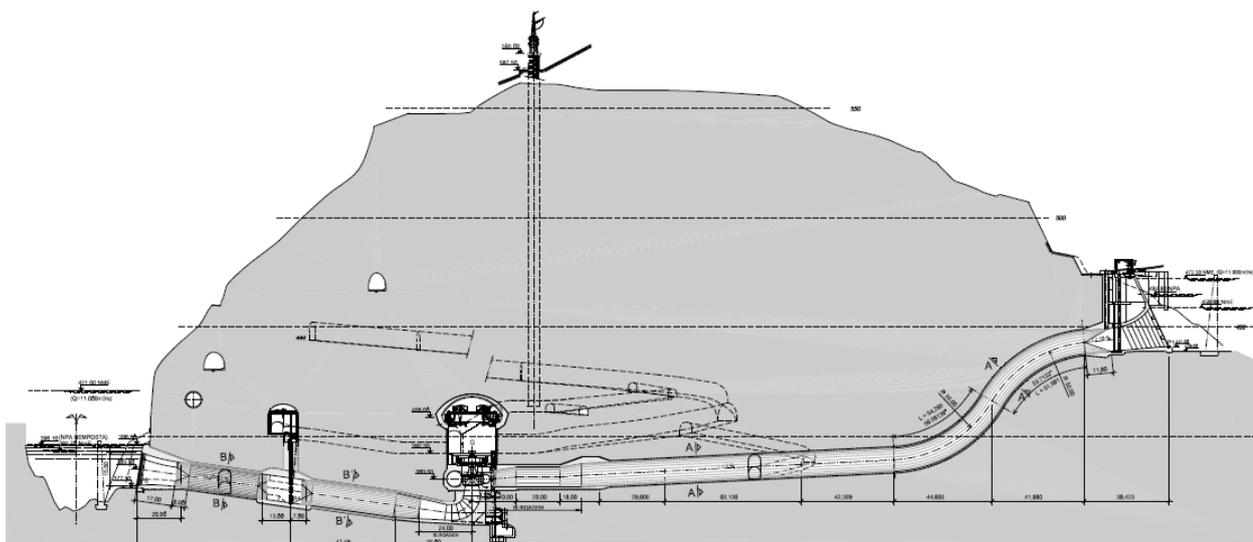


Fig. 39 – Picote II. Perfil do circuito hidráulico.

A caverna da central (Figura 40) tem uma altura variável entre 58 m na zona do grupo e 25 m no átrio de descarga e montagem. Ao nível do piso principal, tem 68 m de comprimento e 23 m de largura entre hasteais. Para instalar os equipamentos auxiliares, criaram-se vários pisos técnicos abaixo da cota do piso principal. Para o transformador principal e o posto de corte da central foi escavada uma caverna (câmara do transformador) com 14,8 m de comprimento, 13,0 m de largura e teto abobadado com 13,5 m de altura máxima. O pavimento desta câmara está à mesma cota do piso principal e comunica com a caverna da central através de uma galeria com 20 m de comprimento.

A movimentação dos equipamentos na central é assegurada por uma ponte rolante com capacidade nominal de 600 toneladas, com caminhos de rolamento suportados na estrutura da abóbada. Esta obrigou a uma escavação com o vão de 33 m e apoia-se diretamente no maciço subjacente cuja contenção lateral é assegurada por pregagens e betão projetado. No dimensionamento estrutural da abóbada de betão, para além da elevada carga da ponte rolante, foi tido em consideração o efeito da descompressão decorrente da escavação do núcleo da central, uma vez que esta se processou após a betonagem da abóbada (Lima et al., 2007).

Para suportar o dimensionamento das contenções e suportes, bem como da estrutura da abóbada, foi elaborado um modelo numérico tridimensional fundamentado em resultados de ensaios de caracterização laboratorial e *in situ* realizados pelo LNEC (Figura 41). Tal permitiu simular o faseamento das escavações da central e caverna do transformador. Foi ainda implementado um plano de monitorização, articulado com o LNEC, que integrou extensómetros de varas para a observação do comportamento do maciço, extensómetros elétricos do tipo Carlson e células de pressão para a monitorização do comportamento da abóbada.

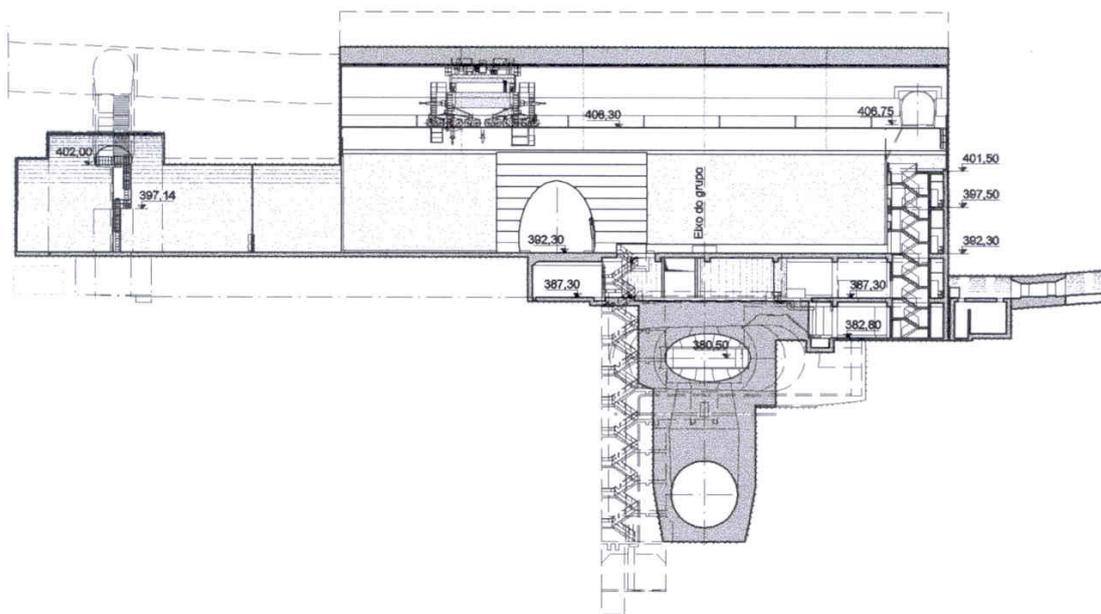


Fig. 40 – Picote II. Corte longitudinal pela central e câmara do transformador.

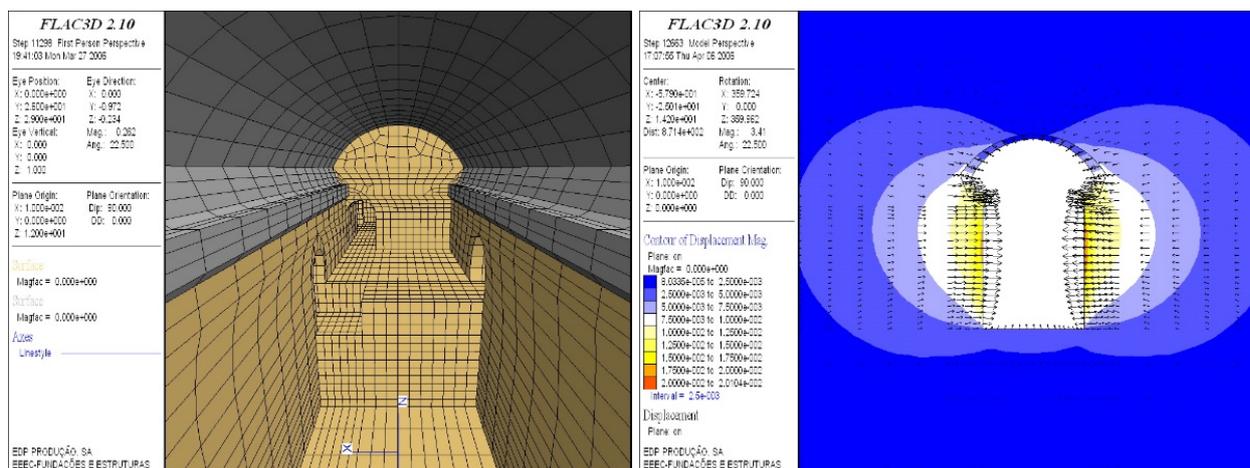


Fig. 41 – Central de Picote II. Modelo numérico: a) perspectiva da malha no interior da central; b) corte com representação dos deslocamentos no final das escavações (Esteves et al., 2008).

Para além da central e do circuito hidráulico, destacam-se, como elementos relevantes, o túnel de acesso à central a partir do exterior, elemento fundamental para a estratégia da obra (tanto no âmbito da construção civil como para o transporte dos equipamentos), e o poço de cabos e ventilação, por onde passam os cabos isolados a 220 kV que asseguram o transporte da energia produzida na central e permite a ventilação adequada da própria central. Este poço, com cerca de 180 m de altura e um diâmetro interior de 4,30 m, é revestido com betão armado e aloja uma escada a toda a sua altura que permite a inspeção dos cabos.

Entre as centrais, foi estabelecida uma ligação que aproveitou o troço final do túnel de ataque à primeira central e requereu, ainda, a execução de um túnel com 75 m de extensão, diâmetro de 3,50 m e inclinação próxima de 8%, escavado com recurso à tecnologia de *raise-boring* como forma de minorar o efeito das vibrações na central em exploração.

4.3.2 – Circuitos hidráulicos longos com central a jusante

O aproveitamento de **Vilar-Tabuaço** (Figura 42) é, até ao presente, o que possui o circuito hidráulico mais extenso em Portugal (cerca de 17,5 km). De entre os aproveitamentos com circuito hidráulico longo e central em caverna é o único cujo funcionamento hidráulico permitiu uma restituição em túnel não revestido e sem chaminé de equilíbrio (EDP, 1992). A conceção do circuito de adução apresenta analogias com a de outros aproveitamentos caracterizados por incluírem um trecho extenso, em túnel pouco inclinado e com ganho de carga hidráulica relativamente reduzido, seguido de outro trecho, com acentuado declive e correspondente ganho de carga, materializado por conduta metálica, de que são exemplo as aduções que servem a central de Vila Nova e a adução da central de Vilarinho das Furnas.

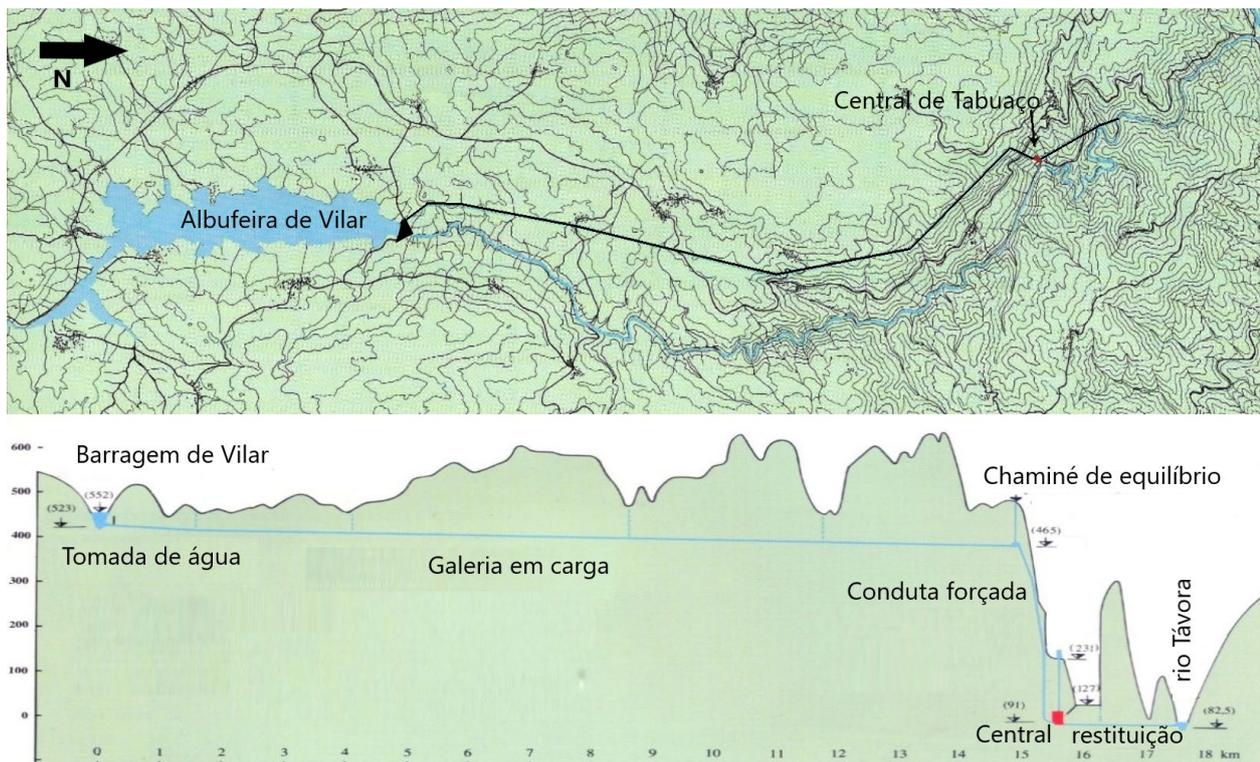


Fig. 42 – Aproveitamento hidroelétrico de Vilar-Tabuaço. Circuito hidráulico. Planta e corte.

A tomada de água do aproveitamento de Vilar-Tabuaço situa-se junto ao encontro esquerdo da barragem de Vilar, no rio Távora. Neste encontro, um poço garante o acesso à câmara da comporta de obturação do túnel em carga e aos órgãos de comando da comporta. O túnel, com cerca de 15 km de extensão e 2,85 m de diâmetro médio, revestido com betão, termina na chaminé de equilíbrio constituída por um poço com cerca de 84 m de altura e secção circular de 2,80 m de diâmetro. A chaminé tem duas câmaras de alimentação, de secção elítica, com área de 11 m² e 18 m de comprimento, na parte inferior, e uma câmara de expansão, de secção retangular com 30 m² de área e 70 m de extensão, a coroar o poço.

Após a chaminé de equilíbrio, a adução de água à central é feita por conduta forçada, com 665 m de comprimento total, subdividida em troços de características distintas. No primeiro troço, a conduta está inserida numa galeria visitável, a que se segue um troço a céu aberto e, por último, um troço constituído por um poço blindado com 156 m de altura. A proteção da conduta forçada é feita por uma válvula de fecho automático, do tipo borboleta, com 2,30m de diâmetro, instalada numa câmara localizada imediatamente a seguir à chaminé de equilíbrio.

A central tem 40m de comprimento, 15 m de largura e 27 m de altura máxima. A abóbada é revestida por um arco em betão apoiado no maciço rochoso (metassedimentar) em entalhes localizados na parte superior dos hasteais. Estruturalmente, esse arco é independente das estruturas subjacentes. As vigas de suporte do caminho de rolamentos da ponte rolante apoiam-se em pilares distribuídos ao longo dos hasteais (Figura 43).

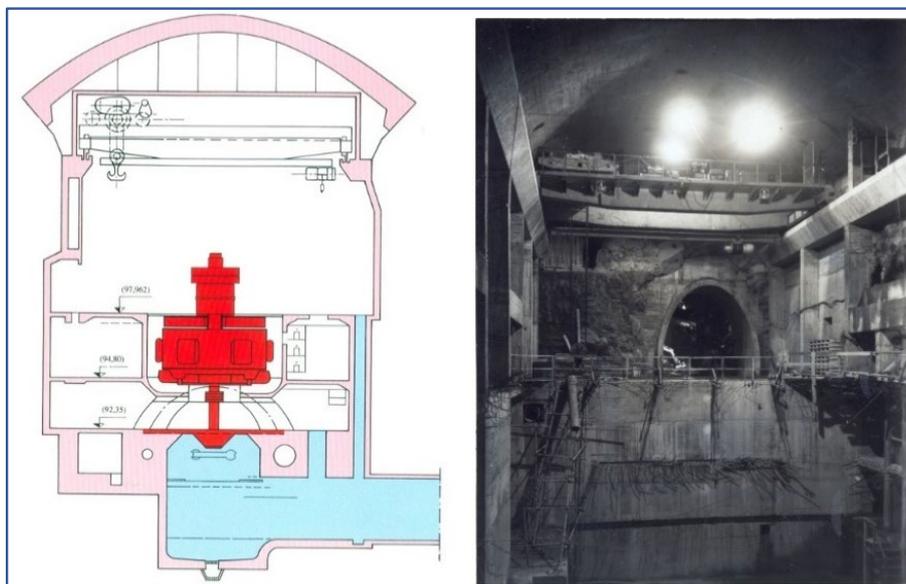


Fig. 43 – Central de Vilar-Tabuaço. Corte transversal e foto com a ponte rolante já em serviço.

A restituição da água turbinada é feita cerca de 2 km a jusante da central, por túnel não revestido com 9 m² de secção. Nos trechos com condições geotécnicas mais desfavoráveis, foram adotados, como suporte, gunite (betão projetado) e anéis de betão cofrado.

O acesso à central faz-se a partir do edifício de comando implantado à superfície através de um poço vertical com 135 m de altura e 6 m de diâmetro. Um túnel utilizado durante a escavação da central, pouco inclinado e com entrada protegida por uma porta estanque, permite também o acesso de grandes equipamentos.

4.3.3 – Circuitos hidráulicos longos com central a montante

Os aproveitamentos hidroelétricos de Salamonde, Caniçada e Alto Rabagão construídos por esta ordem nas décadas 1950-1960, dispõem de centrais em caverna incluídas nesta categoria, cujas características de referência são apresentadas no Quadro 5. Também nesta categoria, há a referir o aproveitamento do Alto Lindoso, com a maior potência instalada à data da sua entrada em serviço (1992), e o reforço de potência do aproveitamento de Salamonde, Salamonde II (2016), cujas características de referência são apresentadas no Quadro 6.

Em complemento, no Quadro 7, apresentam-se outras características destes aproveitamentos hidroelétricos relativas à central, incluindo acessos, e à adução e restituição do circuito hidráulico.

Como singularidades dos aproveitamentos construídos no primeiro período, pela HICA, regista-se que Salamonde é o primeiro aproveitamento hidroelétrico construído em Portugal com central em caverna, Caniçada é o aproveitamento cujo circuito hidráulico apresenta a mais extensa restituição, logo seguido do aproveitamento do Alto Rabagão. Este último é o primeiro aproveitamento construído em Portugal com o objetivo específico de uma regularização hidrológica interanual, para além duma reserva de potência e de um apoio estival, e é também o primeiro aproveitamento a ser dotado de bombagem.

Quadro 7 – Circuitos hidráulicos longos com central a montante. Características.

		Salamonde	Caniçada	Alto Rabagão	Alto Lindoso			Salamonde II
					Grupos	VE	VB	
Central	Comprimento (m)	30	40	44	91	60	63	66
	Largura (m)	13	18	18	21	10	10	26,5
	Altura máxima (m)	31,5	30	37	47,85	23	26	56,2
	Abóbada Suporte	arco em betão	arco em betão	arco de volta inteira, em betão,	arco em betão armado	arcos em betão armado	arcos em betão armado	pregagem e bpf
	Hasteais Suporte	pregagem	pregagem	acima do piso principal	pregagem e bpf	bp	pregagem ocasional	pregagem
	Pontes rolantes Suporte	vigas suspensas da abóbada	vigas suspensas da abóbada	suspensa e encastrada no arco	integrada na abóbada	vigas sobre pilares	vigas sobre pilares	vigas ancoradas e apoiadas em pilares
	Formação geológica	granito	granito	granito	granito			granito
	Acessos	poço: h = 121 m d = 7,0 m	poço: h = 134 m d = 7,5 m	poço: h = 130 m d = 7,5 m	poço: h = 350 m; di = 6,8 m galeria: l = 1780 m; secção: 60 m ²			poço: h = 180 m; d = 7,2 m galeria(ferradura): l = 985 m; d = 8,2 m; h = 8,4m
Adução	Secção corrente	di = 4,1 e 3,3 m	d = 4,85 m	di = 7,8 m a 9,1 m ²	di = 6,0 m > cota (180) di = 5,1 m < cota (180)			di = 8,30 m di = 5,80 m (troço blindado - 46 m)
	Revestimento	betão e blindagem envolta em betão	betão e blindagem envolta em betão	blindagem envolta em betão	betão armado > cota (180) blindagem < cota (180)			betão armado e blindagem envolta em betão (46 m)
Restituição	Secção corrente	ferradura A=29,9 m ²	ferradura A=38,35m ²	circular A = 10,2 a 12,9 m ²	circular di= 8,30 m A = 54 m ²			di = 11,5 m (nominal)
	Revestimento	não revestida	não revestida	betão cofrado	betão cofrado			bpf + pregagem

bp - betão projetado; bpf - betão projetado com fibras; di - diâmetro interior; h - altura; l - comprimento
VE - caverna das válvulas esféricas; VB - caverna das válvulas borboleta

As configurações dos circuitos hidráulicos e centrais destes aproveitamentos evidenciam algumas similitudes e também evoluções havidas entre eles. Como princípios orientadores adotados pela HICA, a localização e orientação das cavernas foram escolhidas tendo em vista os seguintes condicionamentos (Fernandes, 1955):

- conseguir que as aduções, sob elevada pressão, fossem o mais curtas possível e permitissem uma entrada conveniente na caverna das condutas de alimentação das turbinas;
- conseguir um adequado traçado das obras de restituição da água depois de turbinada;
- posicionar a caverna e o poço de acesso imediatamente a jusante da barragem e ao abrigo da cortina de injeções da fundação desta;
- a posição do poço de acesso e a localização, no exterior, do edifício da subestação.

O conjunto dos princípios referidos são, genericamente, válidos para as cavernas das restantes centrais deste item, como também para as descritas no item 4.3.1.

No aproveitamento de **Salamonde**, a central situa-se imediatamente a jusante da barragem, do lado da margem esquerda, a cerca de 50 m abaixo do leito do rio. A caverna tem 30 m de comprimento, 13 m de largura e 31,5 m de altura máxima. A abóbada é revestida por um arco em betão não armado em cujas nascenças foram suspensas, por tirantes, as vigas da ponte rolante, o que permitiu a betonagem antecipada destas vigas e a montagem da ponte rolante, logo que concluídas as escavações principais da central (EDP, 2006a).

A central comunica com o edifício da subestação, localizado no exterior, por um poço de acesso com 7 m de diâmetro e 121 m de altura revestido com betão. Nele foram instalados os barramentos que ligam os alternadores aos transformadores principais, os cabos que fazem a interligação da caverna com o edifício da subestação, uma escada de serviço, um monta-cargas e a conduta metálica de ventilação da chaminé de equilíbrio.

A galeria em carga, com 128 m de extensão total, apresenta dois troços distintos: o primeiro com 10% de inclinação, secção circular de 4,10 m de diâmetro e 41,3 m de extensão, e o segundo com 85% de inclinação, secções circulares de 4,10 m e 3,30 m de diâmetro e 86,7 m de comprimento (Figura 44).

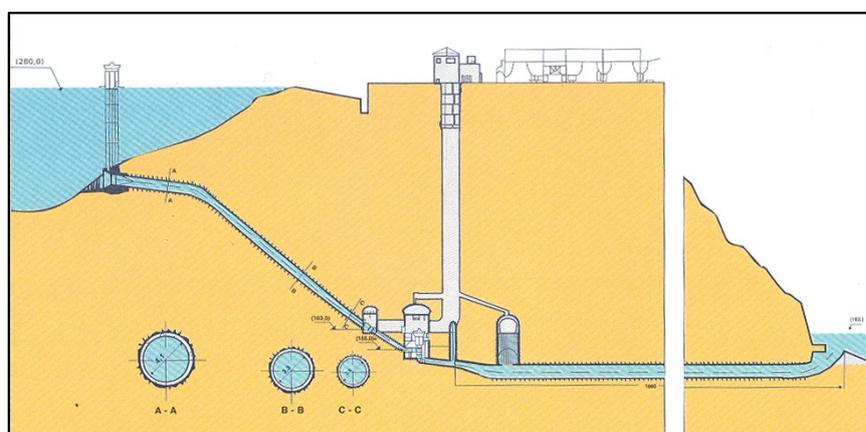


Fig. 44 – Aproveitamento hidroelétrico de Salamonde. Corte pelo circuito hidráulico.

No final, a galeria em carga bifurca-se nas duas condutas de alimentação das turbinas, nas quais se inserem as respetivas válvulas de admissão instaladas numa câmara separada da caverna da central. As condutas de alimentação das turbinas, para além da face das paredes da câmara de válvulas bem como o último troço da galeria em carga, são revestidas com blindagem metálica, dotada de anéis de reforço contra possíveis pressões externas, e anel de betão encostado à rocha (Figura 45).

Depois de turbinada, a restituição da água é feita, a baixa pressão, por uma galeria de fuga, de 29,9 m² de secção em forma de ferradura standard e 1860 m de comprimento, em maciço granítico de boa qualidade que permitiu dispensar qualquer revestimento, exceto em pequenos troços cujo total pouco excedeu os 100 m. A chaminé de equilíbrio, situada poucos metros a jusante da central, comunica com a galeria de fuga pelo teto através de orifício circular de 3,00 m de diâmetro. É formada por uma câmara inferior, de 330 m² de secção e 8,0 m de altura média (soleira à cota (147,90)), ligada por poço vertical, de secção circular de 80 m², à câmara superior, esta com 420 m² de secção horizontal e 6,7 m de altura (soleira à cota (164,40)). A ventilação da chaminé é assegurada por uma galeria que parte do teto da câmara superior e vai ligar, no poço de acesso à central, a uma conduta metálica que sobe ao longo deste e desemboca ao ar livre.

Em comunicação com o poço de acesso à caverna, situa-se a câmara das comportas ensecadeira revestida com betão. As comportas, quando colocadas nas condutas de saída da água das turbinas, permitem pôr estas a seco para trabalhos de inspeção e reparação.

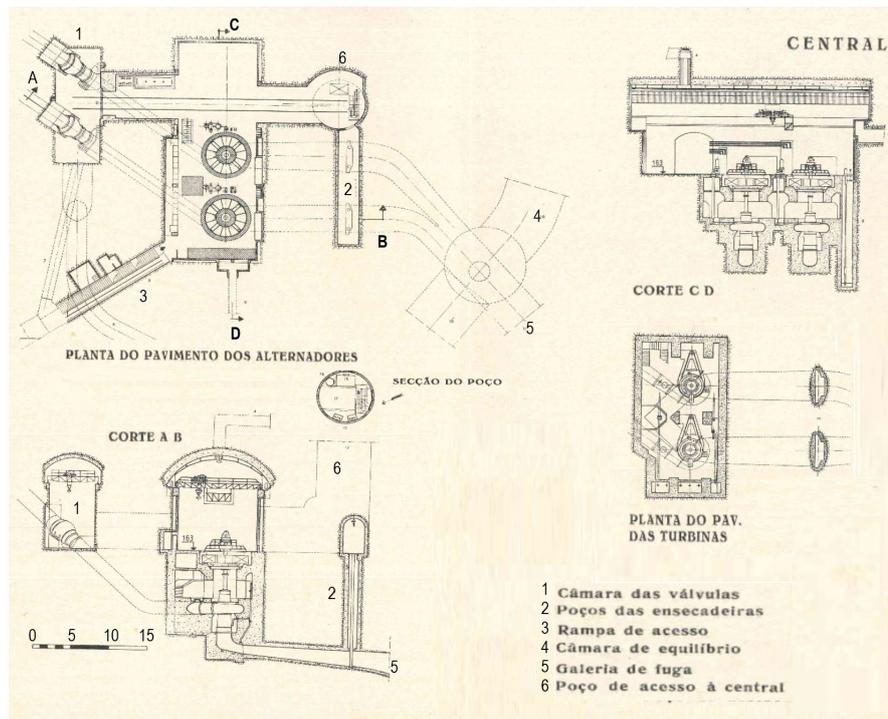


Fig. 45 – Aproveitamento hidroelétrico de Salamonde. Cortes e plantas da central.

O aproveitamento de **Caniçada** (Figura 46) tem uma conceção similar à adotada no aproveitamento de Salamonde, destacando-se como principal diferença o facto de a caverna da central de Caniçada ter uma largura 5 m superior, o que permitiu dispensar as cavidades específicas para alojar os órgãos mecânicos de ensecamento dos grupos (HICA, 1968).

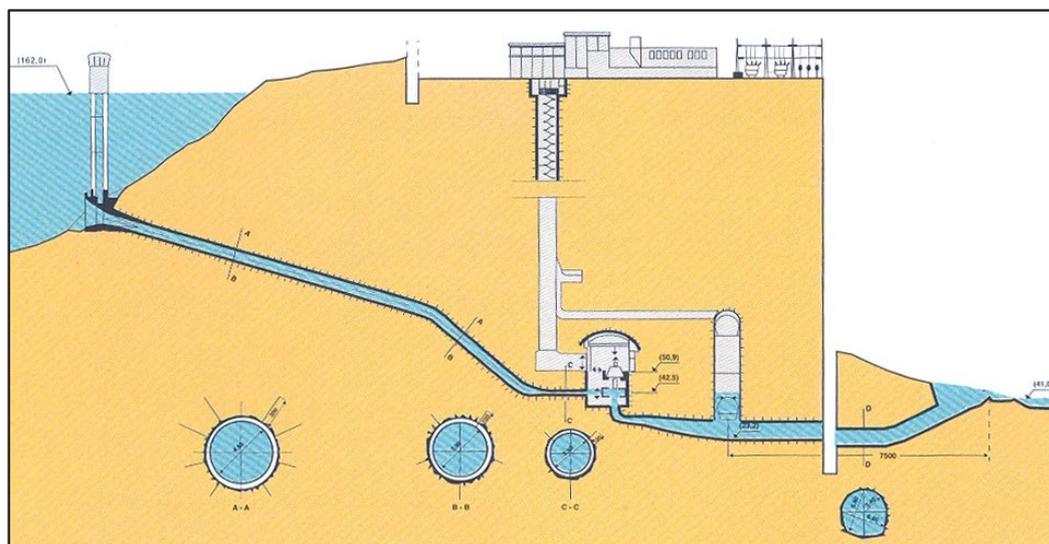


Fig. 46 – Aproveitamento hidroelétrico de Caniçada. Corte pelo circuito hidráulico.

O aproveitamento do **Alto Rabagão** apresenta, como principais elementos diferenciadores no que reporta ao circuito hidráulico, uma tomada de água inserida no corpo da barragem e um circuito de adução blindado. Este atravessa o perfil gravidade da barragem para depois mergulhar em poço vertical com 133 m de altura, a que se segue um troço horizontal que, na proximidade da central, bifurca por forma a alimentar as duas turbinas-bomba. A restituição, a jusante dos ramais

provenientes dos grupos, consiste numa galeria circular integralmente revestida com betão (HICA, 1968). Em bombagem, a circulação da água faz-se no sentido inverso pelas mesmas condutas, à exceção dos ramos que alimentam as bombas que elevam a água da albufeira de Venda Nova para a albufeira do Alto Rabagão (Figura 47).

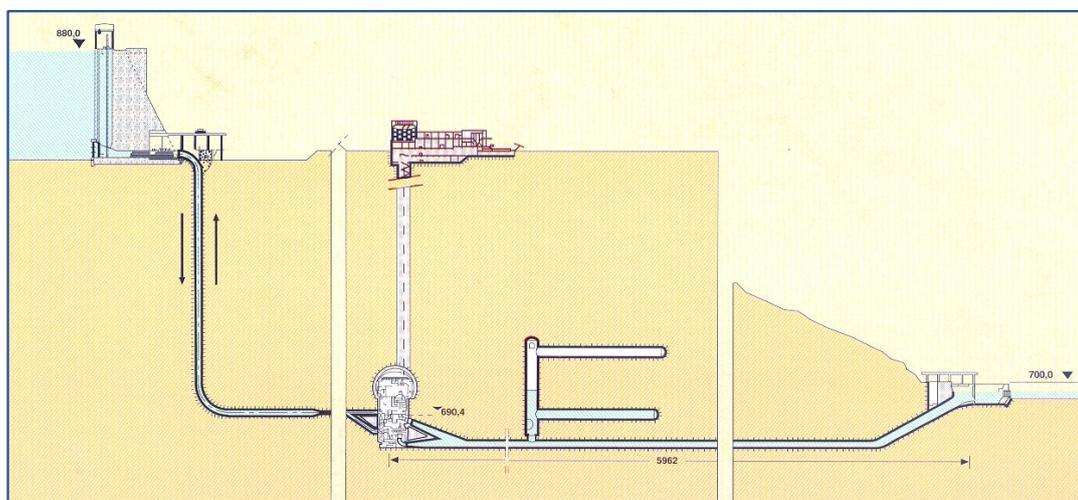


Fig. 47 – Aproveitamento hidroelétrico de Alto Rabagão. Corte pelo circuito hidráulico.

A caverna da central do Alto Rabagão, embora inicialmente prevista com uma configuração semelhante à de Caniçada, acabou por ser revestida, a partir do nível do piso principal da central, por um arco de volta inteira em betão, solução estrutural considerada como mais adequada face à menor qualidade do maciço rochoso. No final da construção, foram erguidas paredes desligadas dos hasteais e elevadas até à estrutura de apoio do caminho de rolamentos, as quais dão a falsa ilusão de hasteais verticais.

O aproveitamento do **Alto Lindoso** é uma das obras mais relevantes no panorama das obras hidroelétricas realizadas em Portugal (Figura 48).

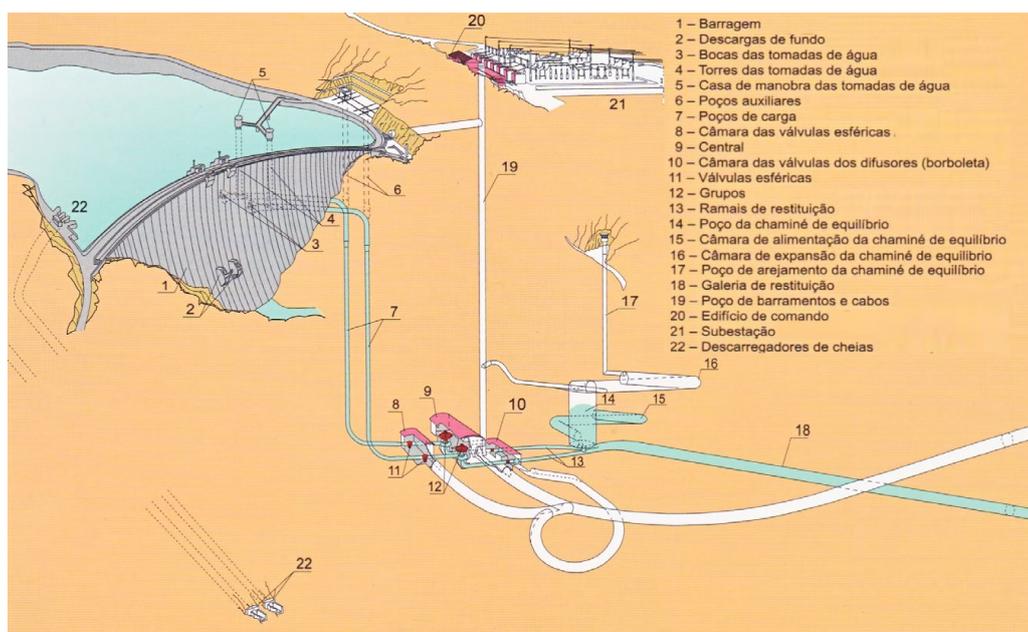


Fig. 48 – Aproveitamento hidroelétrico de Alto Lindoso. Perspetiva.

A multidisciplinaridade e valia deste empreendimento tiveram expressiva repercussão a nível internacional, traduzida na atribuição do relevante prémio “Puente de Alcántara”, destinado a premiar as melhores obras públicas espanholas, portuguesas e ibero-americanas avaliadas nas suas vertentes culturais, estéticas, funcionais e sociais, assim como relativamente à qualidade técnica do respetivo projeto e à perfeição atingida na sua execução.

Na componente das obras subterrâneas, constitui um marco assinalável pelo layout, dimensão e tipo de obras, a maioria destas realizadas a grandes profundidades, sendo de assinalar que foi o primeiro aproveitamento hidroelétrico construído em Portugal onde foi utilizada a técnica de *raise-boring* na abertura de poços. A conceção do aproveitamento beneficiou da participação de técnicos que, para além da competência, tinham grande experiência adquirida nos empreendimentos com obras subterrâneas construídos nas décadas de 50 e 60. A estes, juntou-se um número significativo de jovens técnicos que iniciaram a atividade, neste tipo de obras, na segunda metade da década de 70 e década de 80, cuja experiência, aqui adquirida, viria a mostrar-se de grande utilidade nos projetos de aproveitamentos hidroelétricos realizados no presente século.

A central do aproveitamento do Alto Lindoso localiza-se, em planta, a cerca de 70 m a sul do encontro esquerdo da barragem. Está situada a cerca 350 m de profundidade em relação à superfície do terreno e 200 m abaixo do nível do rio Lima.

O circuito hidráulico entre as tomadas de água e a boca de saída da restituição tem, em planta, uma extensão com cerca de 5340 m. Entre as tomadas de água e a chaminé de equilíbrio, a cada grupo gerador corresponde um circuito independente. Um pouco a jusante da chaminé, os dois circuitos unem-se na galeria de restituição que vai desembocar na albufeira de Touvedo, cerca de 900 m a montante da antiga central de Lindoso (Figura 49) (EDP, 1993).

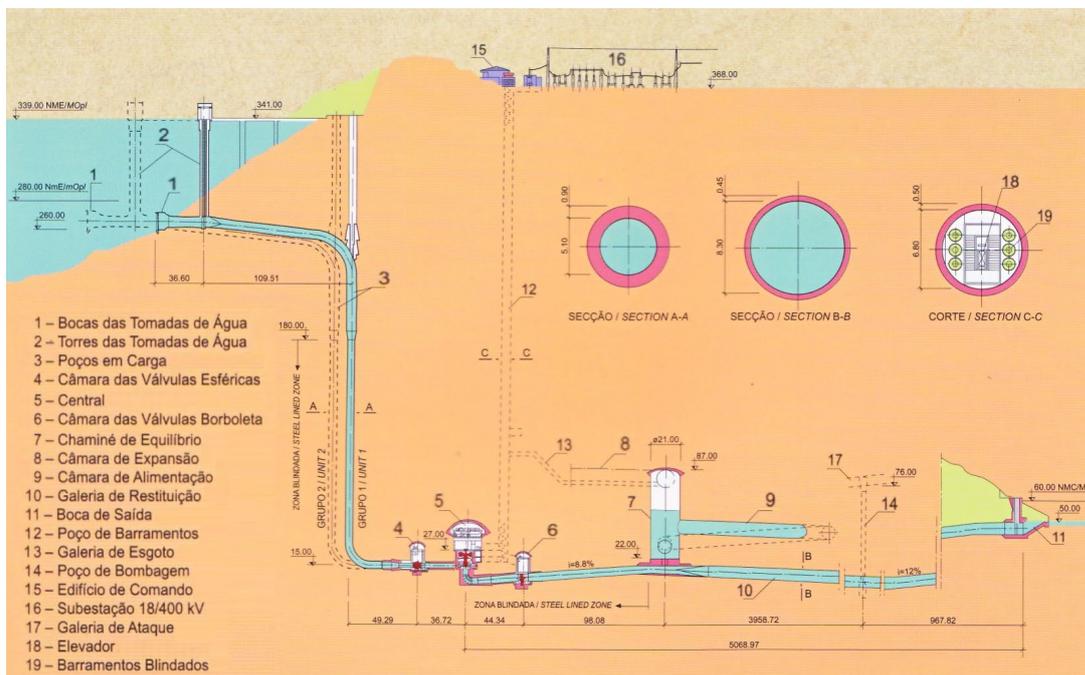


Fig. 49 – Aproveitamento hidroelétrico de Alto Lindoso. Circuito hidráulico. Perfil longitudinal.

Após as tomadas de água, a adução a cada grupo faz-se por curtas galerias e poços em carga, com cerca de 240 metros de altura, revestidos por um anel de betão armado com 6,00 m de diâmetro interior acima da cota (180), sendo os 165 m inferiores revestidos com blindagem, com diâmetro interior de 5,10m, que se prolonga até às válvulas esféricas. Os ramais de restituição, a jusante das válvulas borboleta e até à chaminé de equilíbrio, são blindados, com diâmetro interior de 5,75 m.

A chaminé de equilíbrio tem forma cilíndrica, com 21 m de diâmetro e 65 m de altura, e é revestida com betão armado. É provida de uma câmara superior de expansão e uma câmara inferior de alimentação. Estas câmaras têm, respetivamente, 300 m e 380 m de desenvolvimento, 12 m e 9,50 m de diâmetro e volumes de 36 000 m³ e 27 000 m³.

O complexo da central é constituído por três cavernas: a principal, onde estão instalados os grupos, a caverna das válvulas esféricas a montante daquela e a caverna das válvulas borboleta a jusante da caverna principal. (Figura 50) A partir da central, estabeleceram-se ligações com ambas as câmaras e uma ligação vertical, em poço, com o edifício de comando e a subestação. Neste poço, encontram-se instalados os barramentos condutores da energia produzida, os cabos de sinalização e comando, uma escada e um ascensor com um curso de 341,35 m.

Para acesso definitivo e ataque das escavações do complexo de cavernas, chaminé de equilíbrio e frente de montante da galeria de restituição, foi escavado um túnel com 1780 m de extensão, secção livre de 60 m², 7,85 m de altura e 11% de pendente, que permite o acesso rodoviário à central.

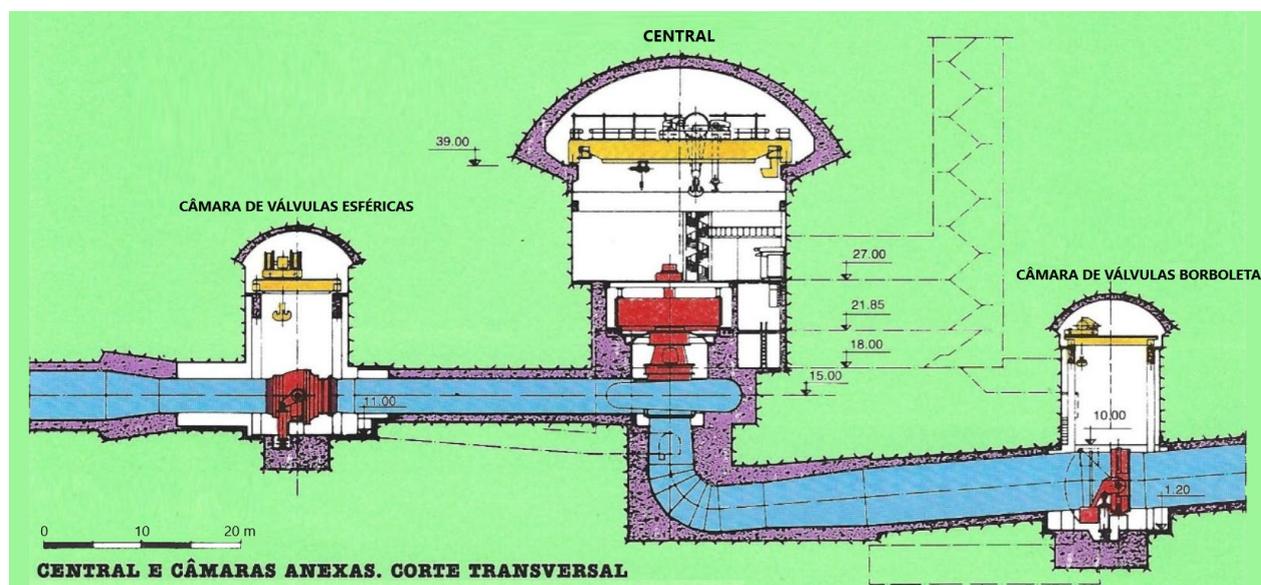


Fig. 50 – Aproveitamento hidroelétrico de Alto Lindoso. Cavernas do complexo da central.

Na fase de escavação, quando o túnel de acesso atingiu o nível do piso principal da central, foi escavada uma galeria piloto de prospeção ao longo do eixo da caverna. A partir do túnel de acesso, foram escavados túneis até às entradas das duas câmaras de válvulas. Estas escavações, realizadas em antecipação às obras principais, permitiram, para além da caracterização geológica das superfícies escavadas, a realização, pelo LNEC, de ensaios de caracterização geomecânica (deformabilidade – LFJ, determinação do estado de tensão - SFJ e STT, microsísmica de refração segundo eixos paralelos ao eixo da caverna principal) e a colheita de amostras para ensaios laboratoriais (compressão uniaxial, com estudo da anisotropia do módulo de deformabilidade, deslizamento sobre descontinuidades) (Lima e Neiva, 1995). A informação obtida serviu de suporte às análises de comportamento do maciço envolvente das grandes cavidades subterrâneas, tendo sido para o efeito relevante a implementação do plano de monitorização, também acompanhado pelo LNEC (Figura 51).

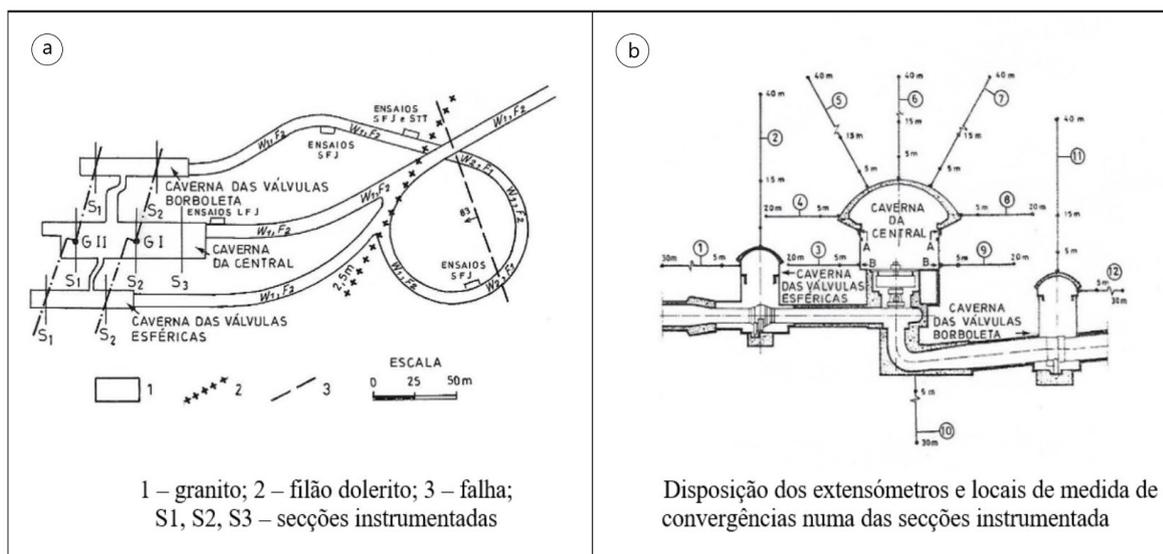


Fig. 51 – Complexo de cavernas da central do Alto Lindoso: a) planta com caracterização e localização dos ensaios e das secções instrumentadas; b) representação duma secção instrumentada

A primeira caverna a ser escavada foi a dos grupos, tendo-se começado pela abóbada. Embora ao nível do pavimento principal, a caverna tenha 21 m de largura, ao nível de inserção da abóbada, a largura da escavação foi de 33m por necessidade de assegurar uma entrega adequada no maciço rochoso e simultaneamente garantir um pé direito livre de 6 m acima do caminho de rolamentos. Nas paredes, para além do suporte com pregagem sistemática e betão projetado, foram realizadas vigas de contenção ancoradas, posicionadas imediatamente abaixo da estrutura da abóbada onde foram fixados os carris da ponte rolante.

No teto da caverna das válvulas esféricas, em zonas localizadas, utilizou-se como suporte betão projetado, rede metálica e pregagem, tendo sido, no final, construída uma abóbada em betão sobre cada uma das válvulas. Nas paredes, aplicou-se sistematicamente betão projetado e em áreas restritas utilizou-se rede metálica e pregagem. No teto da caverna das válvulas borboleta, foram também construídas abóbadas em betão sobre as válvulas e betão projetado na parte restante. Nas paredes, ocasionalmente, foram utilizadas pregagens.

O reforço de potência designado por **Salamonde II**, caracteriza-se por ter um circuito hidráulico subterrâneo integralmente situado na margem esquerda. A caverna da central localiza-se a cerca de 200 m de profundidade e a uma distância de cerca de 90 m, em planta, da caverna dos grupos da central antiga (EDP Produção, 2019).

A dimensão das secções de escavação dos elementos do circuito hidráulico e da central, comparativamente com as dos restantes aproveitamentos construídos na bacia do Cávado nas décadas de 50-60, é bastante superior, em resultado das diferenças associadas à grandeza da potência instalada, do caudal e do número e características dos grupos. Por ser equipado com um grupo reversível, constituído por turbina-bomba, resultou daí a necessidade de descida da cota do plano referência da roda da turbina, cerca de 30 m, em relação à cota de referência do aproveitamento inicial.

Para além destes aspetos, o layout de Salamonde II apresenta similitudes com o observado em parte das configurações dos aproveitamentos focados neste item (Figura 52). Registam-se, no entanto, alguns elementos diferenciadores (abóbada da central, viga do caminho de rolamentos, restituição) que também estão presentes nas soluções adotadas nos aproveitamentos de Venda Nova II e de Venda Nova III, estes focados no próximo item.

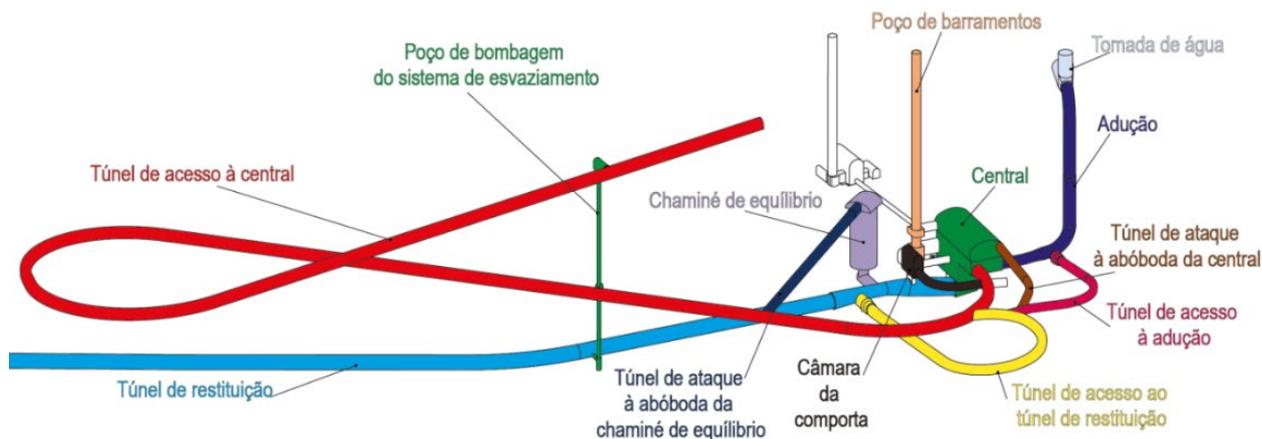


Fig. 52 – Aproveitamento hidroelétrico de Salamonde II. Perspetiva. (Plasencia, 2014).

No âmbito das obras subterrâneas do circuito hidráulico, realçam-se a solução de esvaziamento do túnel de restituição que permite, numa situação de emergência, esvaziar as águas através dum poço para bombagem com cerca de 180 de altura, e a adoção, em grande parte da restituição, dum revestimento contínuo constituído por betão projetado, exceto em zonas de terreno com piores características geotécnicas e em zonas singulares de interferência com outras estruturas da restituição.

Na caverna da central, como suporte definitivo da abóboda, procedeu-se a pregagem sistemática e aplicação de betão projetado com fibras, e pregagem nos hasteais. As vigas de caminho de rolamentos foram, numa primeira fase, apenas suportadas por ancoragens ativas e, posteriormente, também por pilares betonados contra os hasteais à medida do crescimento das estruturas internas da caverna.

4.3.4 – Circuitos hidráulicos longos com adução e restituição longas

Neste item, incluem-se os reforços de potência de Venda Nova II e de Venda Nova III cujos circuitos hidráulicos e centrais, respetivamente designadas por Frades I e Frades II, foram implantados na margem esquerda do rio Rabagão. São dotados com dois grupos reversíveis, cada um, que aproveitam o desnível de 420 m entre as albufeiras das barragens de Venda Nova e de Salamonde numa extensão com cerca de 4,5 km. Na Figura 53 apresenta-se a sua configuração, bem com a do circuito hidráulico de Venda Nova / Vila Nova do aproveitamento hidroelétrico de Venda Nova.

Os circuitos hidráulicos destes reforços de potência têm a particularidade de, na maior parte da extensão dos túneis, não serem revestidos e terem suporte flexível - betão projetado com fibras metálicas e pregagens - em alternativa a uma solução rígida, com betão cofrado. Esta solução foi, pela primeira vez em Portugal, adotada num túnel em carga no caso de Venda Nova II (Costa et al., 2004).

Por sua vez, o reforço de potência de Venda Nova III apresenta a particularidade de ser equipado com duas máquinas assíncronas de velocidade variável, tecnologia ainda pouco utilizada a nível mundial ⁶ (EDP Produção, 2019).

⁶ Esta tecnologia maximiza o armazenamento de energia, por bombagem, permitindo que cada uma das bombas absorva uma potência que pode variar gradualmente e de forma contínua entre os 300 e os 390 MW, enquanto em modo turbina consegue emitir uma potência de 390 MW, que pode ser atingida em apenas 80 segundos. Para tal, o alternador-motor é de dupla alimentação, sendo a excitação do rotor assegurada por um conversor de frequência (VSI - Voltage Source Invertor).

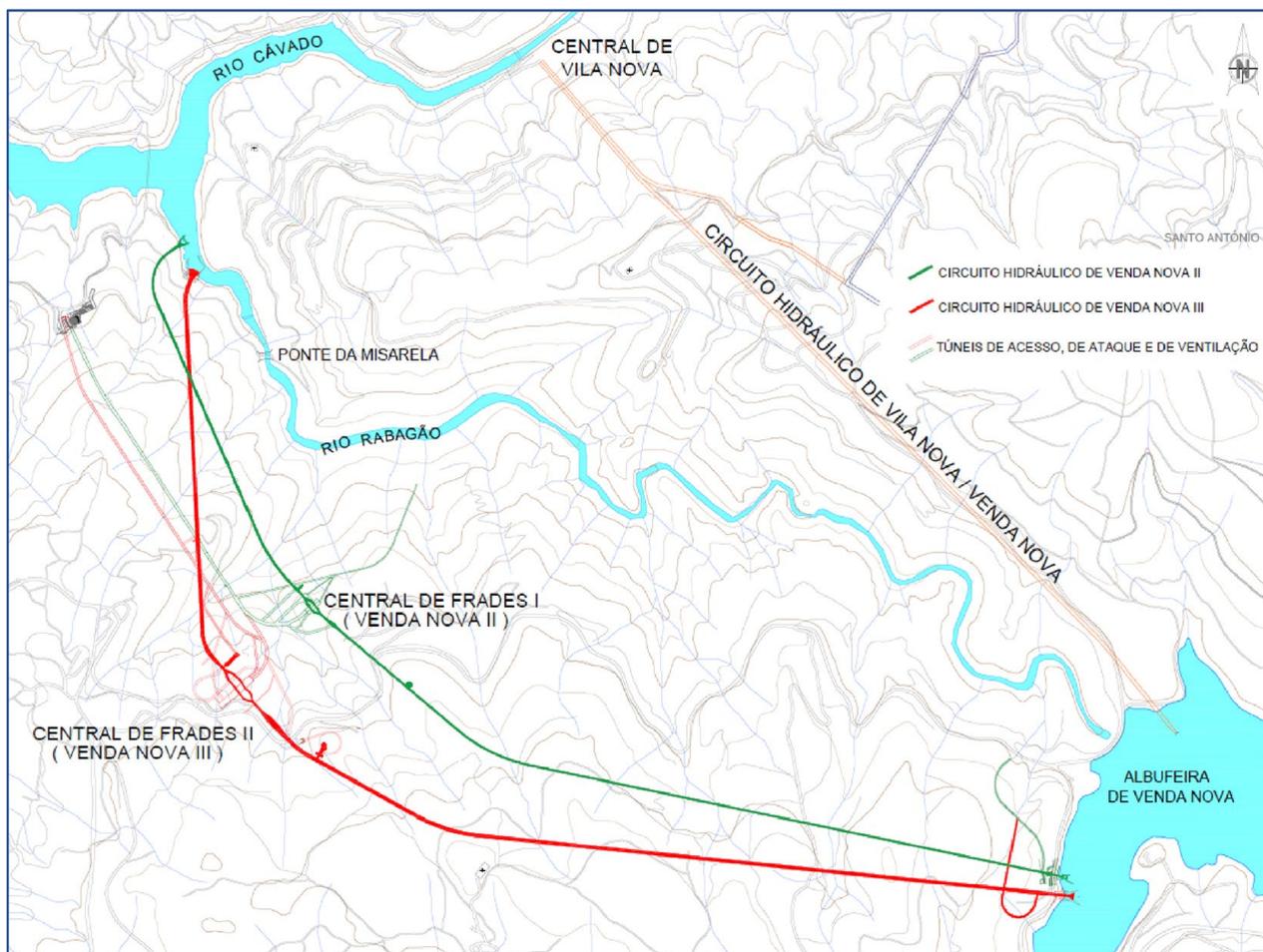


Fig. 53 – Aproveitamentos hidroelétricos de Venda Nova: Venda Nova / Vila Nova (1951), Venda Nova II / Frades I (2005) e Venda Nova III / Frades II (2016).

Na essência, os **circuitos hidráulicos** destes reforços de potência são compostos por tomada de água na albufeira de Venda Nova, túnel em carga (com cerca de 2,8 km de extensão e 14% de inclinação), chaminé de equilíbrio superior, desarenador (seguido de um troço blindado adjacente à central do lado montante), chaminé de equilíbrio inferior, túnel de restituição (com cerca de 1,4 km de comprimento) e restituição (utilizada como tomada de água em modo bomba) na albufeira de Salamonde.

Nas Figura 54 e na Figura 55 representa-se em perspetiva, respetivamente, o esquema geral do circuito hidráulico de Venda Nova II e o esquema do conjunto dos dois reforços de potência. No Quadro 8 apresenta-se um conjunto de informações que permite avaliar de forma comparativa a dimensão relativa de ambos.

Os **túneis da restituição** são subhorizontais, apresentando o de Venda Nova II uma ligeira pendente ascendente para jusante, o que permite, em caso de necessidade, o seu esvaziamento por gravidade para o poço de bombagem da central. Em Venda Nova III, o túnel de restituição tem um ponto baixo, numa posição intermédia entre a central e o bocal de restituição, que possibilita o seu esvaziamento através de um poço com cerca de 90 m de altura e secção circular com 3 m de diâmetro. No que concerne ao seu traçado, condições topográficas e geotécnicas levaram a adotar uma solução em que o túnel de Venda Nova III se cruza, em planta, com o de Venda Nova II, passando sob este a uma distância de cerca de 30 m.

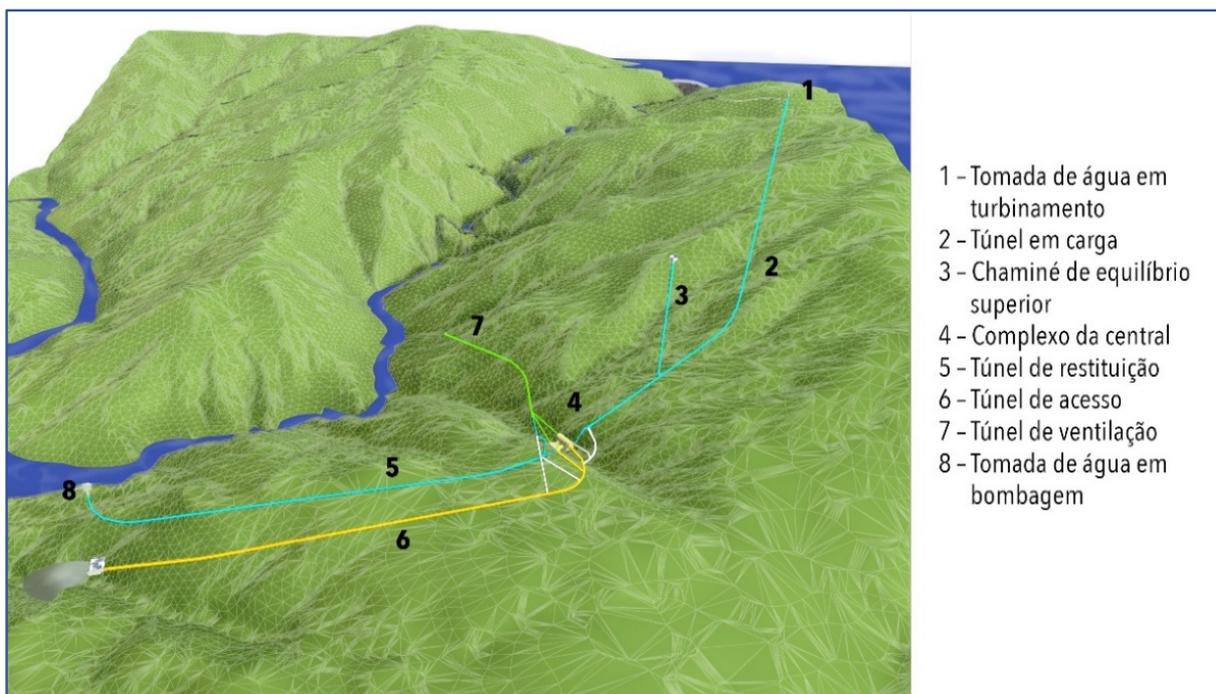


Fig. 54 – Reforço de potência de Venda Nova II. Esquema geral do circuito hidráulico.

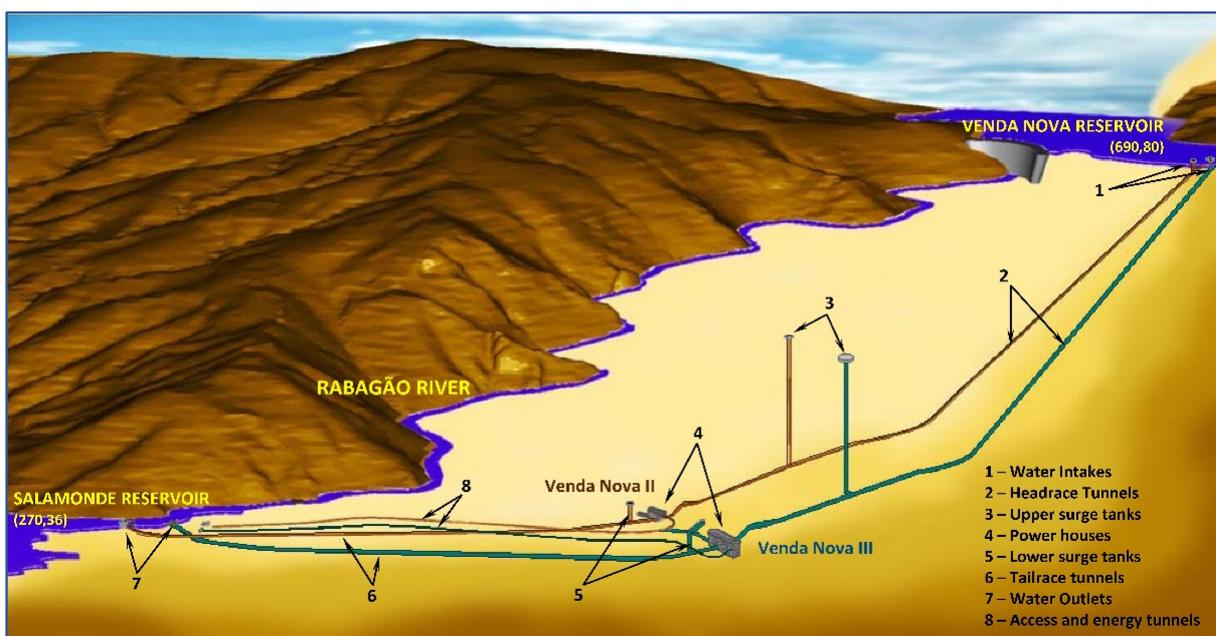


Fig. 55 – Esquema geral dos reforços de potência de Venda Nova II e Venda Nova III.

Os **túneis de adução** têm um desenvolvimento próximo, mas divergindo no sentido da central, à medida que a carga hidráulica sobe. Por razões de segurança, adotou-se, para Venda Nova III, um traçado mais afastado do vale e com maior cobertura de terreno que o de Venda Nova II. Em complemento, tendo em consideração o facto de Venda Nova II se ter mantido em operação durante a execução do túnel de Venda Nova III, foram definidos procedimentos específicos para prospeção sistemática das condições de afluxo de água à frente de escavação, com furos exploratórios (Figura 56), bem como procedimentos para o eventual tratamento por injeções, caso tal afluxo fosse excessivo.

Quadro 8 – Circuitos hidráulicos de Venda Nova II e Venda Nova III.

		Venda Nova II / Frades I	Venda Nova III / Frades II
Central	Equipamento	2 grupos reversíveis, com uma potência de 97,4 MW/106,4 MVA cada, correspondendo a um caudal turbinado de 25 m ³ /s e a um caudal de 20 m ³ /s em modo bomba	2 grupos reversíveis de velocidade variável, com uma potência nominal de 390,5 MW/420 MVA cada, correspondendo a um caudal turbinado de 100 m ³ /s e a um caudal de 88,5 m ³ /s em modo bomba
	Caverna dos grupos	l = 60 m; b = 19 m; h = 40 m	l = 103 m; b = 25 m; h = 60 m
	Caverna dos transformadores	l = 40 m; b = 14 m; h = 11 m	l = 50 m; b = 19,6 m; h = 23,85 m
	Câmara das comportas	(<i>orgãos de manobra inseridos na caverna da central</i>)	l = 43 m; b = 11 m; h = 10,4 m
Adução (em turbinamento)	Bocal	b = 10 m; h = 7 m	b = 18 m; h = 12 m
	Túnel em carga	l = 2 800 m d = 6,30 m (característico)	l = 2 806 m d = 12,00 m (característico)
	Desarenador superior	l = 45 m di = 10 m (máximo)	l = 105 m di = 20 m (máximo)
	Chaminé de equilíbrio superior	poço vertical com h = 420 m e câmara de expansão à superfície; parte inferior do poço com d = 4,5 m de diâmetro (não revestido) e parte superior (h = 100 m) revestida com betão armado com di = 5,0m	2 poços com d = 5,4 m e h = 340 m estabelecem a ligação entre o túnel em carga e a câmara de alimentação; acima desta, a chaminé desenvolve-se em poço revestido (betão armado) com d = 13 m e h = 78 m, até à câmara de expansão, à superfície.
Restituição	Bocal	b = 15 m; h = 10 m (*)	b = 30 m; h = 18 m (*)
	Túnel de restituição	l = 1 400 m d = 6,30 m (característico)	l = 1 375 m d = 12,00 m (característico)
	Chaminé de equilíbrio inferior	poço vertical, revestido com betão armado, com d = 5m e h = 58 m e equipado com duas câmaras	poço vertical, revestido com betão armado, com d = 13 m e h = 95 m, dotado de câmara de expansão em túnel
Quantidades	Escavação	450 000 m ³	1 150 000 m ³
	Betão	70 000 m ³	210 000 m ³
	Aço em betão	2 670 t	15 260 t
	Aço em blindagens	250 t	1 150 t
	Aço em pregagens	480 t	1 810 t

b – largura ; d - diâmetro; di - diâmetro interno; h - altura (máxima); l – comprimento; (*) - escavação

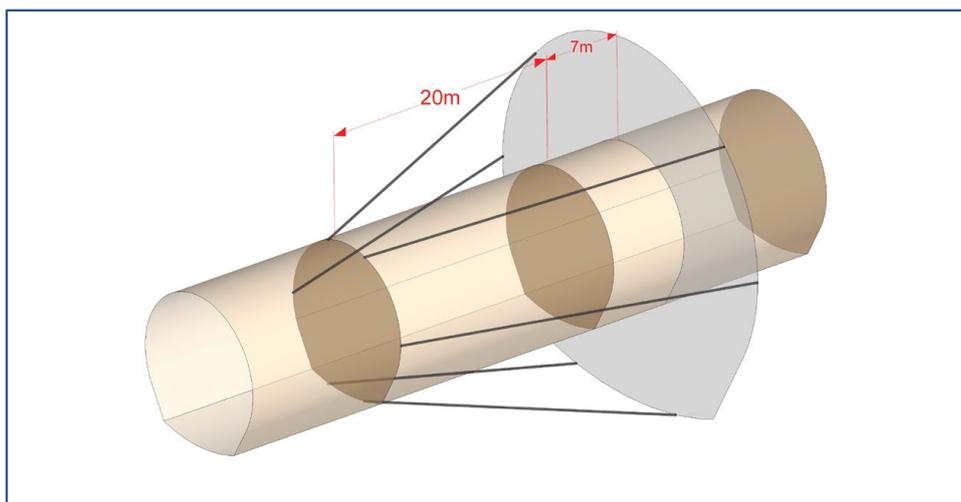


Fig. 56 – Representação esquemática dos furos exploratórios.

Em cada um dos reforços de potência, as secções dos túneis de adução e de restituição são iguais. Registe-se, contudo, que o diâmetro dos túneis de Venda Nova III é praticamente duplo dos túneis de Venda Nova II, o que resulta da relação das características de referência dos grupos (caudal turbinado e potência quádruplos).

Sendo a configuração geral dos circuitos hidráulicos algo semelhante, os maiores desafios colocados no empreendimento de Venda Nova III decorreram, essencialmente, da grandeza relativa dessas características de referência. De entre os vários elementos constituintes do circuito hidráulico, merecem especial referência a chaminé de equilíbrio e desarenador do circuito de adução, assim como o rolhão de obturação do túnel em carga.

No caso das **chaminés de equilíbrio** superiores, as soluções encontradas para cada reforço de potência revelam, por um lado, as diferenças em termos de dimensão, como reflexo direto dos diferentes caudais, mas também, o resultado da integração e influência no projeto dos aspetos hidráulicos, geológico-geotécnicos, construtivos e de segurança.

Com efeito, e embora a segurança dos trabalhos tenha sido determinante para a decisão de recurso à escavação com *raise-boring* a plena secção, no caso da chaminé de equilíbrio de Venda Nova II, as dimensões – altura e diâmetro – permitiram que toda a chaminé tenha sido materializada num único poço.

No caso de Venda Nova III, tal já não foi possível, tendo a solução sido condicionada, em particular, pela capacidade, à época, dos equipamentos de *raise-boring* existentes no mercado, o que veio a determinar uma configuração (Figura 57) que inclui um poço principal com 78 m de altura e 13 m de diâmetro, uma câmara de expansão à superfície, uma câmara de alimentação e dois poços de ligação ao túnel em carga, não revestidos, com 340 m de altura e 5,40 m de diâmetro, escavados com recurso à tecnologia *raise-boring*. A sua implementação requereu a escavação de um túnel até à parte inferior do poço principal, onde foi recolhido o escombro da escavação deste (lançado por um poço auxiliar de menor diâmetro escavado por *raise-boring*), e de onde se desenvolveu a escavação dos poços inferiores iniciada com a realização dos furos piloto com a tecnologia de furação dirigida RVDS, a que se seguiu a escavação por *reaming* ascendente a plena secção.

Contudo, a interceção da escavação com uma zona conturbada associada a falhas e esmagamento de material, a cerca de 70 m da base dos poços, obrigou à interrupção da escavação ascendente, posteriormente retomada, a cotas superiores, a partir de galerias auxiliares que intercetaram os poços acima da zona conturbada (Marques et al., 2017).

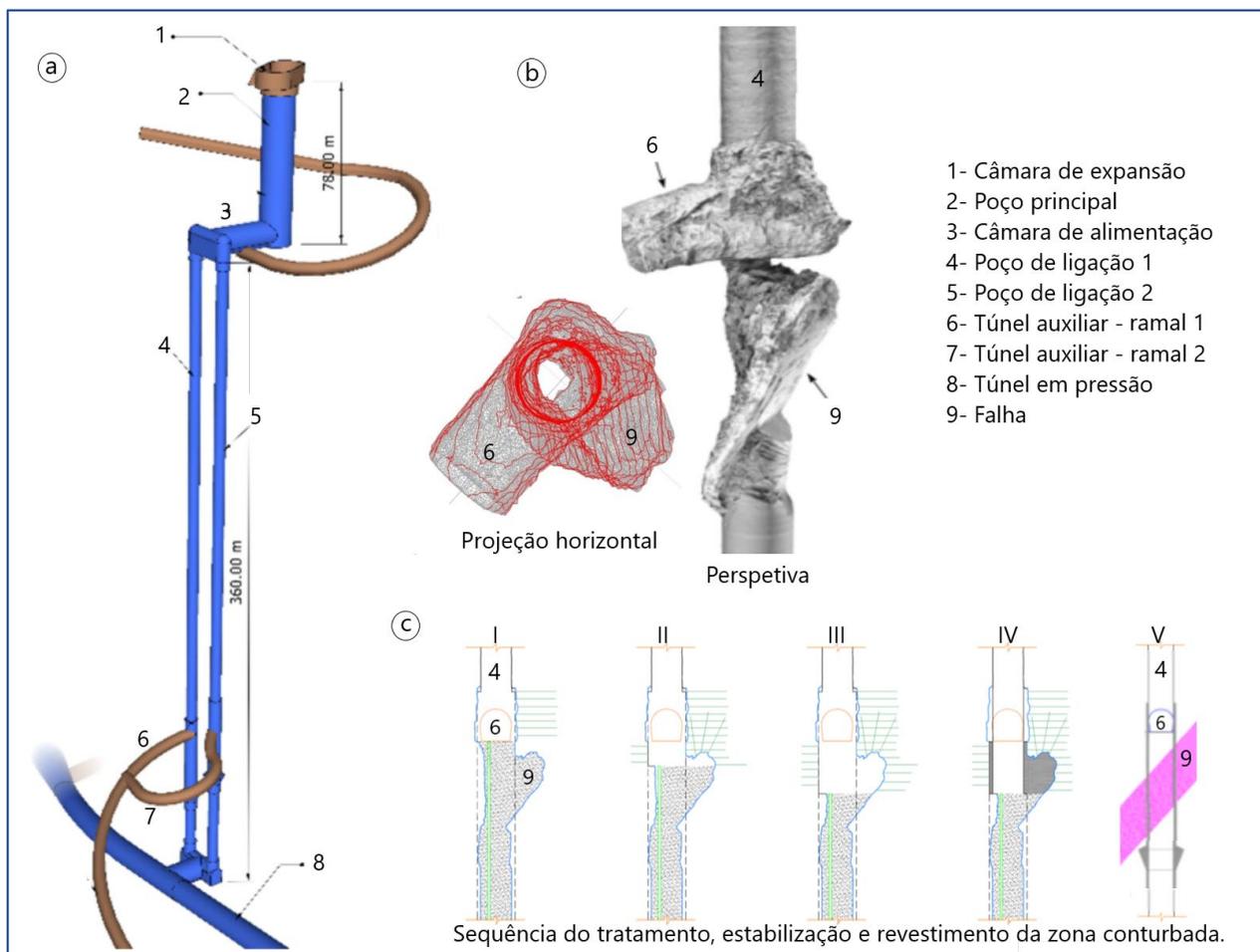


Fig. 57 – Chaminé de equilíbrio de Venda Nova III: a) perspectiva global; b) representação do levantamento 3D da zona conturbada; c) esquema representativo da sequência do tratamento dos poços de ligação na zona da falha.

Estas galerias auxiliares vieram a permitir realizar um conjunto de atividades de elevada complexidade para o tratamento e estabilização da zona conturbada, que incluíram, entre outros, levantamentos 3D por *laser scanning* realizados a partir dos furos piloto, enchimento dos poços com brita, desmonte dos troços por escavar, contenções, injeções, e alargamento e betonagem dos troços dos poços escavados por *raise-boring* contíguos à zona conturbada.

Na proximidade da central, o circuito de adução destes aproveitamentos é revestido com betão armado, com exceção do troço imediatamente a montante da central que é provido de blindagens de aço. Na transição para esta zona, situa-se um **desarenador** com seção transversal variável, que atinge 10 m de diâmetro interior em Venda Nova II e 20 m em Venda Nova III (Figura 58a).

Tratando-se de circuitos hidráulicos maioritariamente não revestidos, o desarenador destina-se a promover a deposição de materiais de maior dimensão, eventualmente arrastados pela água, através do aumento da secção de escoamento e, conseqüentemente, da redução da sua velocidade.

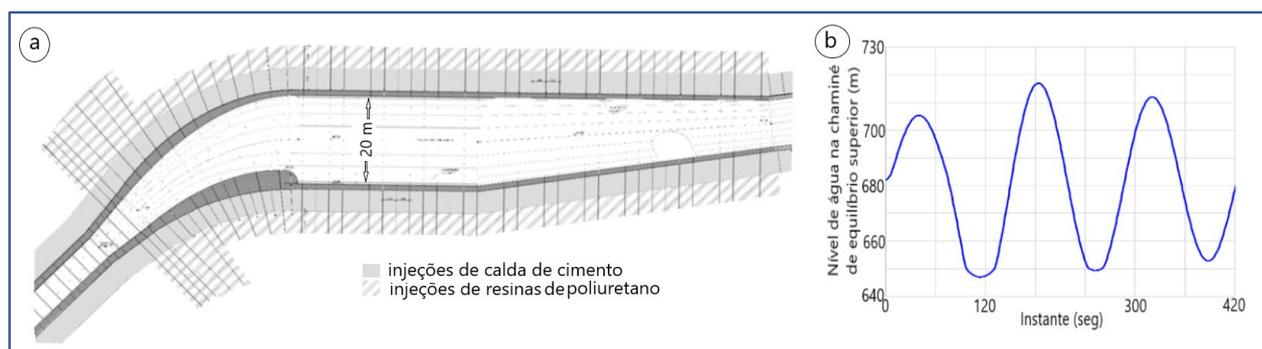


Fig. 58 – Desarenador de Venda Nova III: a) zonas objeto de injeções do maciço com calda de cimento e com resinas de poliuretano; b) pressão hidrostática - oscilação do nível de água na chaminé de equilíbrio em manobra dos grupos.

O desarenador suporta internamente uma pressão hidrostática de 430 m de altura de água (m.c.a.) face ao desnível altimétrico relativamente à albufeira de Venda Nova. Devido a fenómenos resultantes das perturbações no escoamento originadas pela operação dos grupos, ou seja, oscilações de massa e/ou choque hidráulico, a pressão no interior pode oscilar várias dezenas de metros (para mais e para menos) num curto espaço de tempo (Figura 58 b).

No dimensionamento do revestimento, como elemento estrutural de betão armado, foi considerado o contributo do maciço rochoso. Este foi objeto de injeções com calda de cimento, para preenchimento de vazios e consolidação na envolvente próxima da interface betão/rocha. Admitiu-se um diferencial de pressões, entre o intradorso e o extradorso do revestimento, menor que o valor total da pressão interna da água, uma vez que, após as injeções, foram realizados furos de drenagem que atravessam a espessura do revestimento e penetram cerca de 2 m no maciço rochoso. No caso de Venda Nova III, precedendo a abertura dos furos de drenagem, foram ainda realizadas injeções com resina de poliuretano, tendo como objetivo estabelecer uma barreira “impermeável” numa coroa envolvente do maciço tratado com injeções de cimento (Ferreira et al. 2016).

Para a execução das obras subterrâneas, foram escavados diversos túneis de acesso a pontos estratégicos. Previamente ao enchimento do circuito hidráulico, os túneis de acesso a este foram obturados com estruturas de betão, designadas por **rolhões**, concebidas para suportar a pressão da água no interior do circuito hidráulico e minimizar eventuais repasses de água a partir do mesmo. Em ambos os reforços de potência, o rolhão do túnel que permitiu o ataque a partir de ponto localizado um pouco a montante do respetivo desarenador superior, bem como o rolhão do túnel de ataque à restituição inserido próximo da localização da chaminé de equilíbrio inferior, são dotados de uma porta estanque, metálica, inserida na estrutura de betão.

Em Venda Nova III assume particular preponderância o rolhão do circuito de alta pressão, não só por ficar submetido a uma pressão hidrostática similar à do desarenador, mas também por ficar inserido numa zona em que o maciço rochoso é atravessado por duas estruturas geológicas associadas a zonas conturbadas, e por ter uma secção transversal consideravelmente superior ao que é usual neste tipo de estruturas (8,2 m de diâmetro equivalente) (Figura 59).

Para analisar a estabilidade global ao deslizamento do rolhão superior, construiu-se um modelo numérico tridimensional no qual se simulou o comportamento na interface rolhão/rocha e nas juntas entre os blocos do rolhão (Esteves et al., 2018). Deste modo, foi possível aferir o processo de degradação de carga ao longo da extensão do rolhão e dispor de uma base de comparação com os valores lidos nos dispositivos de monitorização instalados no rolhão. Na Figura 59 representa-se a malha utilizada nas simulações numéricas, bem como resultados relativos a deslocamentos do rolhão e a tensões de corte mobilizadas na interface rolhão/rocha.

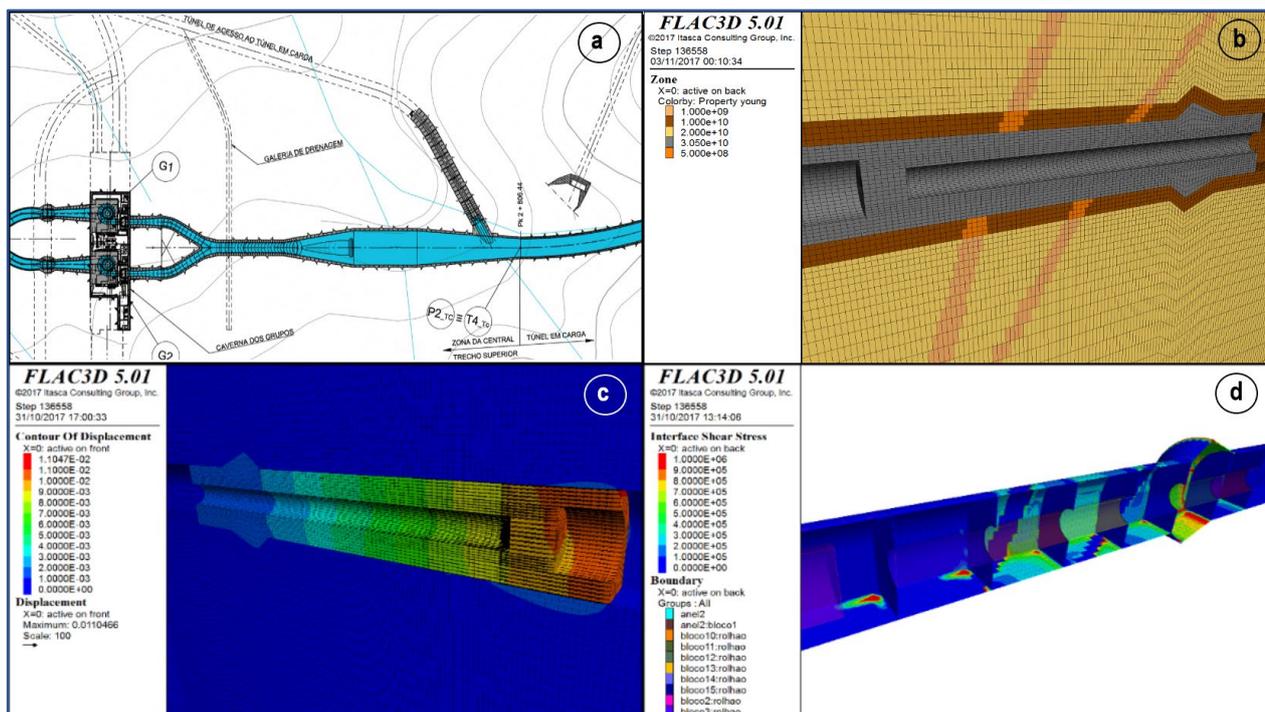


Fig. 59 – Circuito hidráulico de Venda Nova III: a) planta de localização do rolhão e desarenador superior; b) rolhão - perspetiva da malha utilizada nas simulações numéricas; c) rolhão - deslocamentos (m); d) rolhão - tensões de corte (N/m^2) mobilizadas na interface com a rocha.

Após a conclusão dos trabalhos relativos ao circuito hidráulico, procedeu-se ao seu primeiro enchimento. Tratando-se de um circuito hidráulico não revestido, considera-se crítica esta operação, razão pela qual foi elaborado um **plano de enchimento** específico com o objetivo de evitar a ocorrência de acidentes e incidentes.

Neste plano, foram previstos, entre outros, o faseamento do enchimento, as grandezas a monitorizar e respetiva periodicidade, os procedimentos para as operações de manobra dos equipamentos e a antevisão de cenários de risco. No referente ao sistema de observação da obra, esta fase permitiu avaliar a adequabilidade do mesmo para a fase de exploração.

Para o primeiro enchimento dos dois reforços de potência, foram adotados procedimentos similares. No referente a Venda Nova III, este enchimento dividiu-se em duas etapas (Esteves et al., 2017):

- na primeira, fez-se o designado “enchimento por jusante”, ou seja, enchimento do volume do circuito hidráulico que, devido à sua posição altimétrica, foi possível encher a partir do reservatório inferior (albufeira de Salamonde), onde se inclui o túnel de restituição e a parte inferior do circuito de adução (Figura 60). Nesta etapa, a pressão hidrostática máxima no interior do circuito hidráulico foi cerca de 70 m.c.a.;
- na segunda, fez-se o designado “enchimento por montante”, ou seja, enchimento a partir do reservatório superior (albufeira de Venda Nova) do volume remanescente do circuito de adução. Nesta etapa, a pressão hidrostática máxima no interior do circuito hidráulico atingiu um valor próximo de 490 m.c.a..

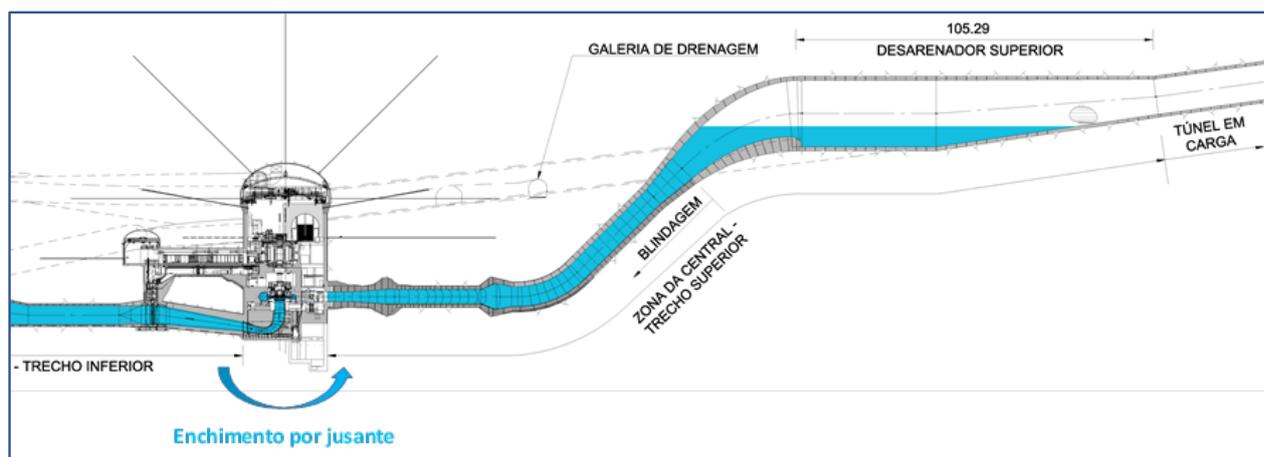


Fig. 60 – Representação esquemática do enchimento da parte inferior do circuito de adução a partir da albufera de Salomonde.

A primeira etapa do enchimento teve uma duração aproximada de cinco dias, enquanto a segunda durou cerca de um mês. Naturalmente que, face aos elevados valores da pressão interna da água, o faseamento do “enchimento por montante” assumiu particular relevância.

O plano estabeleceu o enchimento por patamares, em que a subida do nível da água no interior do circuito hidráulico seria temporariamente suspensa para a realização de observações e avaliação do comportamento da obra. Admitia, também, que poderia haver lugar a adaptações dos patamares, em função da evolução do comportamento observado. O controlo de segurança em cada patamar e a tomada de decisão sobre a prossecução do enchimento basearam-se na análise integrada da informação que foi sendo recolhida.

Para o “enchimento por montante”, previram-se seis patamares de paragem e observação, simplificada designados M2, M3, M4, M5, M6 e M7, posicionados respetivamente às cotas (320), (385), (450), (520), (580) e (640). Nos primeiros três patamares (M2, M3 e M4) previu-se que tivessem uma duração mínima de três dias de paragem do enchimento, e dois dias para os restantes (M5, M6 e M7).

Na prática, o procedimento implementado seguiu, genericamente, o planeado, tendo sido necessário efetuar pequenos ajustes como a duração de alguns patamares e a realização de um patamar adicional de paragem (M8a) no final do enchimento (Figura 61).

Durante essas etapas de enchimento, o comportamento hidráulico do maciço, dos rolhões e das estruturas acessíveis foi monitorizado através da medição de caudais ressurgentes em bicas e drenos, e a medição de pressões em piezómetros instalados nos espaços subterrâneos das centrais de Venda Nova II e de Venda Nova III e suas envolventes, bem como leituras de níveis piezométricos e caudais de pontos de água localizados à superfície.

Estes últimos foram selecionados de um conjunto de 270 pontos de medição (nascentes, poços e furos) incorporados no plano de monitorização das águas subterrâneas, que abrangeu leituras regulares iniciadas antes das escavações subterrâneas de Venda Nova II e que se mantêm durante a fase de exploração das centrais.

De um modo geral, a escavação e enchimento dos circuitos hidráulicos tiveram influência reduzida nos recursos hídricos subterrâneos. Zonas pontuais de impacto localizaram-se nas envolventes das tomadas de água, das chaminés de equilíbrio e nas zonas de falha, tendo-se adotado, sempre que possível, medidas construtivas adequadas para minimizar esses impactes.

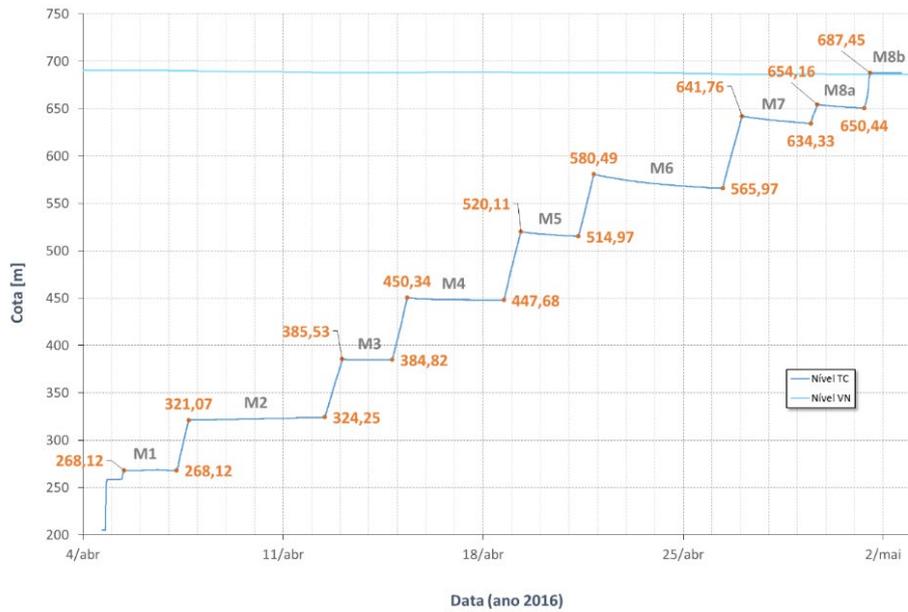


Fig. 61 – Enchimento do circuito hidráulico (adução) de Venda Nova III.

No referente às **centrais**, salienta-se o facto de Venda Nova II, com entrada em serviço em 2005, ser o primeiro aproveitamento construído após o Alto Lindoso com a central instalada em caverna.

Uma vez delineado o traçado do circuito hidráulico de Venda Nova II, o local de implantação das cavernas do complexo da central foi escolhido em função da interpretação da cartografia geológica de superfície, complementada com as informações das amostras obtidas em quatro sondagens verticais, com comprimentos superiores a 365 m, posicionadas nos vértices dum quadrilátero que se sobrepunha à área de implantação das cavernas (Plasencia e Lima, 2003). Os furos de sondagem serviram para a realização de ensaios de absorção de água e, ainda, para a realização de tomografias sísmicas abrangendo a zona interessada pelas cavernas (Figura 62).

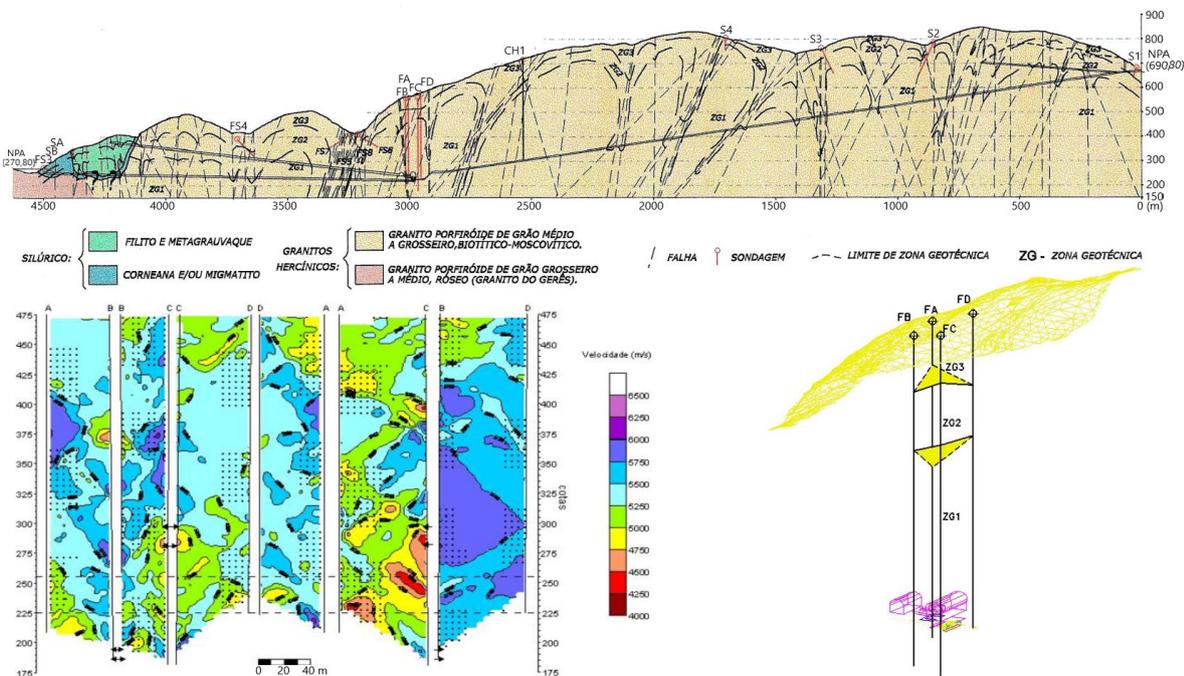


Fig. 62 – Reforço de potência de Venda Nova II. Perfil geológico-geotécnico do circuito hidráulico e prospeções mecânica e geofísica na zona da central.

A localização altimétrica da central foi condicionada pela submergência dos grupos reversíveis em relação à cota da água na albufeira de Salamonde, sendo tal tido em consideração na definição do comprimento das sondagens.

À semelhança do implementado no Alto Lindoso, quando a escavação do túnel de acesso atingiu a zona prevista para a implantação da central, foi executada uma galeria de prospeção ao longo da caverna principal. Foram então realizados, pelo LNEC, ensaios de caracterização *in situ* (deformabilidade – LFJ e determinação do estado de tensão - SFJ e STT) e procedeu-se à caracterização das superfícies escavadas, dando-se especial atenção à compartimentação gerada pelas descontinuidades.

Como resultado do observado, foi então decidido efetuar um pequeno ajuste na localização da caverna principal da central. Por sua vez, os resultados dos ensaios permitiram aferir os parâmetros de projeto necessários às verificações de estabilidade e do comportamento deformacional do maciço envolvente das cavernas e, no seguimento, conferir aos projetistas a confiança para adotar uma solução de suporte flexível para a abóbada da central, o que constituiu outra inovação no panorama das obras hidroelétricas realizadas em Portugal.

Os elementos principais relacionados com a central de Venda Nova II, representados na Figura 63 e as características indicadas no Quadro 8, são compostos por:

- caverna principal, a uma profundidade de cerca de 350 m, onde estão instalados os dois grupos reversíveis, os respetivos equipamentos de comando e controlo e os órgãos de proteção hidráulica;
- caverna onde estão instalados os transformadores e galerias de ligação à caverna principal;
- túnel de acesso à central, não revestido, com características rodoviárias, 8 m de altura, 11% de inclinação e 1,5 km de extensão;
- galeria de ventilação e de segurança, que estabelece uma segunda ligação das duas cavernas ao exterior.

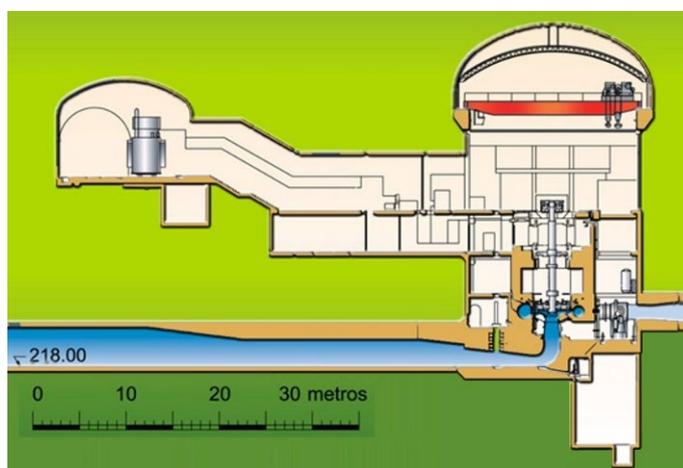


Fig. 63 – Reforço de potência de Venda Nova II. Corte pela central e câmara dos transformadores.

No caso de Venda Nova III, para além dos condicionamentos topográficos e hidráulicos comuns, foram condicionantes da localização do complexo da central: a proximidade de Venda Nova II e a obrigatoriedade de reduzir, na fase de construção, os impactos na exploração desta central; os níveis de vibração admissíveis nos equipamentos instalados em operação e as conseqüentes limitações de vibrações decorrente da utilização de explosivos; a necessidade de interligação entre as duas centrais.

A configuração do complexo da central de Venda Nova III apresenta significativas diferenças em relação a Venda Nova II, justificadas pela relação das características de referência (caudal equipado e potência instalada) destes aproveitamentos e, ainda, pela necessidade de instalação dos

conversores de frequência (VSI). Assim, a compatibilização dos espaços para instalação do conjunto dos equipamentos e dos órgãos de segurança da central (válvulas e comportas de proteção) ditou a necessidade de escavar a caverna principal (câmara dos grupos) para a instalação dos grupos, válvulas esféricas e equipamento auxiliar, outra caverna (câmara dos transformadores), no prolongamento da anterior, para alojar os transformadores, uma terceira caverna (câmara das comportas), paralela à principal, para a instalação das comportas de jusante, e ainda duas galerias, que as interligam, para a instalação dos conversores de frequência (VSI).

Apresenta-se na Figura 64 uma perspetiva do complexo de cavernas da central de Venda Nova III, incluindo as ligações ao circuito hidráulico, túnel de saída de energia e de ventilação e túnel de acesso, assim como uma perspetiva, mais alargada, abarcando o conjunto destas obras e sua relação com as de Venda Nova II.

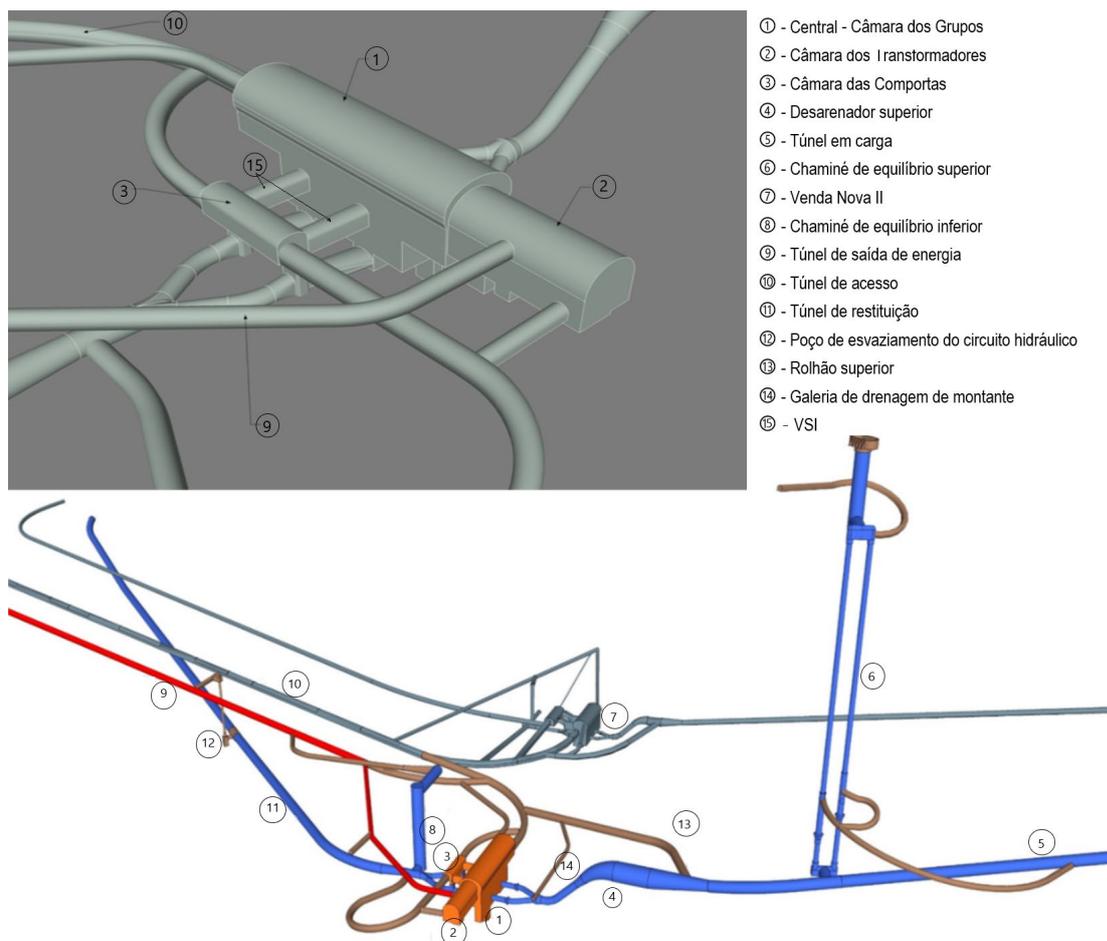


Fig. 64 – Perspetivas esquemáticas das obras subterrâneas na zona da central de Venda Nova III.

A escavação das cavernas principais de ambas as centrais, pela sua altura (em torno dos 50 metros) e pela inserção do acesso definitivo a cerca de metade da altura, exigiu a realização de um túnel específico de ataque à abóbada da caverna para permitir a sua escavação, desde os níveis superiores até à base, sempre com acesso franco e direto para os meios humanos e equipamentos. Tendo o referido túnel de ataque atingido a parte superior da central, realizou-se, a partir deste, a abertura de duas galerias longitudinais ao longo da central, ao nível da abóbada, e de curtas galerias transversais para permitir a instalação dos extensómetros de varas para monitorização dos deslocamentos do maciço rochoso.

Após a escavação destas galerias, aplicação do respetivo suporte definitivo e instalação dos extensómetros, completou-se a escavação da abóbada até ao nível que permitiu a execução das vigas

de apoio das pontes rolantes, suportadas temporariamente por ancoragens ativas. A restante escavação, até à base do poço de bombagem, foi executada por desmonte em bancada, sendo o acesso e a remoção do escombro feito pelos diversos túneis e acessos escavados a cotas inferiores. Atingidas estas, iniciou-se a construção dos pisos da central, intercalada com as atividades de montagem dos componentes dos grupos embebidos nas estruturas betonadas.

No âmbito do projeto, aferidos os parâmetros geotécnicos, foram efetuadas modelações numéricas em que se simulou o avanço das escavações nas suas várias fases e avaliaram-se os esforços induzidos no maciço rochoso e nos elementos constituintes dos sistemas de suporte. Além disso, visando definir parâmetros aferidores da segurança da obra, foram também calculados os valores dos deslocamentos esperados em pontos alvo do maciço nas imediações das cavernas, os quais foram posteriormente comparados com os deslocamentos observados durante a execução da obra (Lima et al. 2002). No Quadro 9 representa-se, de forma esquemática, a sequência da escavação modelada e descreve-se o sistema de suporte aplicado em cada fase no projeto de Venda Nova II, acompanhada de fotografias tiradas no decorrer da obra que mostram a evolução real da escavação.

A monitorização das deformações sofridas pelo maciço rochoso nas imediações das escavações foi efetuada com recurso a extensómetros (duplos e triplos) de varas, instalados em duas secções transversais à central, e a marcas de convergência. Os pontos de ancoragem dos extensómetros situam-se a profundidades variando entre os 5 m e os 40 m, tal como indicado na Figura 65. Através da comparação dos valores dos deslocamentos medidos com os deslocamentos previstos nas modelações, foi possível interpretar o comportamento da obra ao longo das sucessivas fases de escavação e, através da análise dos resultados, validar os parâmetros assumidos no projeto.

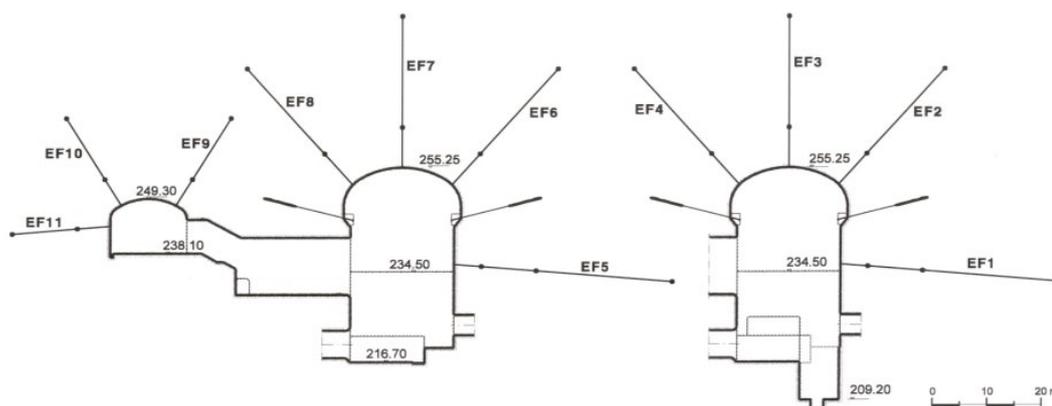


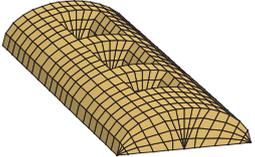
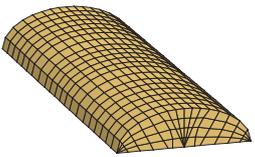
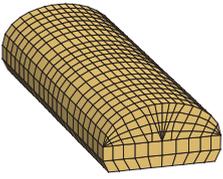
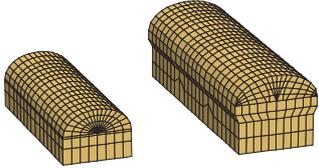
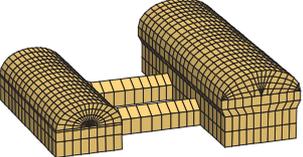
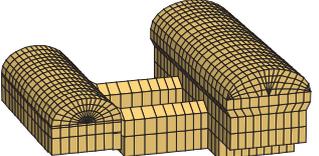
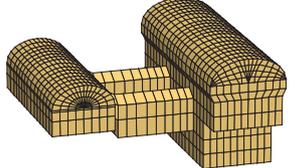
Fig. 65 – Central de Venda Nova II. Secções instrumentadas com extensómetros (duas).

Para além da análise de estabilidade global referida, realizou-se uma análise das condições de estabilidade dos blocos de rocha passíveis de se formarem no contorno da escavação (estabilidade local). Esta análise serviu também para o dimensionamento do sistema de suporte da abóbada e das paredes das cavernas. Quando da execução das escavações da abóbada, previamente à aplicação do betão projetado, procedeu-se à caracterização das superfícies escavadas, validaram-se as hipóteses formuladas no projeto que serviram de base àquele dimensionamento e, atendendo à compartimentação determinada pelas discontinuidades, foram definidos reforços localizados. No complexo da central de Venda Nova III, foram adotadas metodologias similares no projeto, na monitorização, nas escavações e dimensionamento dos suportes, naturalmente beneficiando dum conhecimento acrescido adquirido na obra de Venda Nova II, mas adaptadas à diferença de dimensões e demais especificidades (Queralt et al., 2013).

Concluídos os trabalhos de escavação da Central, tiveram início os betões estruturais dos diversos pisos, bem como as montagens dos equipamentos a embeber, tais como os difusores, espirais, fossas dos alternadores, entre outros. Os desafios e dificuldades, de que correntemente se

revestem estes tipos de trabalhos nos aproveitamentos hidroelétricos, tiveram maior relevância no caso da central de Venda Nova III devido à grande dimensão, complexidade e simultaneidade de trabalhos de construção civil em diversas frentes, somado à simultaneidade e complexidade das montagens de equipamentos.

Quadro 9 – Sequência da escavação na central de Venda Nova II.

Fase	Modelo	Descrição	Fotos
1		Escavação de duas galerias laterais, ao nível das nascenças da abóbada, desenvolvendo-se em toda a extensão da central e de quatro galerias transversais ligando aquelas duas. Instalação dos extensómetros (Figura 76) da abóbada.	
2		Escavação total do arco da caverna principal.	
3		Escavação da caverna principal até 1,5m abaixo das vigas de apoio da ponte rolante.	
4		Após a realização das vigas ancoradas de apoio à ponte rolante, escavação da caverna da central até ao nível das galerias de ligação com a caverna dos transformadores. Em simultâneo, escavação da caverna dos transformadores.	
5		Escavação da parte superior das galerias de ligação entre as cavernas da central e dos transformadores. Instalação dos extensómetros (Figura 76) dos hasteais.	
6		Escavação da central, rebaixando-se a soleira em mais 4m e conclusão da escavação das galerias de ligação entre as duas cavernas maiores.	
7		Finalização da escavação da central.	

Resta salientar que os projetos dos reforços de potência de Venda Nova II e de Venda Nova III tiveram em consideração diversas soluções de mitigação de potenciais impactes ambientais (Plasencia et al., 2015). Desde a fase de conceção em que, para dar resposta à preocupação de afetação dos recursos utilizados para consumos de água para fins agrícolas, se procuraram configurações com coberturas que aumentassem a garantia de encontrar um maciço rochoso tendencialmente impermeável, até à fase final da construção, com preocupações de recuperação da

paisagem, nomeadamente das escomboreiras resultantes dos materiais provenientes das escavações subterrâneas que não foram utilizados como agregados nos betões ou em aterros diversos e muros.

Com a conclusão do comissionamento dos grupos no final de 2016, Venda Nova III passou a ser a central hidroelétrica da EDP com maior potência instalada e a única na Península Ibérica equipada com grupos assíncronos reversíveis de velocidade variável.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste documento, foram apresentados vários projetos hidroelétricos realizados em Portugal que são o resultado do trabalho, competência, arte e engenho de equipas multidisciplinares. São por si só exemplos extraordinários de engenharia, de arquitetura e de arte.

Na história da hidroeletricidade em Portugal, é possível constatar a indissociabilidade destes projetos com as Obras Subterrâneas e a evolução do conhecimento que potenciou na comunidade técnica e científica Portuguesa. Com efeito, passando de uma situação de quase total dependência de consultores e executantes estrangeiros, várias gerações de técnicos, especialistas, académicos, empresas e outras entidades, de entre as quais se releva a participação do LNEC, conseguiram atingir uma total autonomia na prossecução e superação dos inúmeros desafios inerentes a este tipo de projetos.

Para além desta evidência, ao longo dos tempos, tem sido assegurada uma eficaz transmissão de conhecimento e de experiências às gerações seguintes que, por seu lado, também souberam juntar a ambição e o arrojo de inovar e de ir mais além, como ficou evidente na evolução de muitas das soluções seguidas e nos múltiplos aspetos inovadores apresentados.

Os reconhecimentos nacionais e internacionais que receberam algumas das obras aqui apresentadas são a evidência do nível de excelência atingida nas mais variadas áreas do saber e conhecimento, para o qual as Obras Subterrâneas foram sempre fator presente e determinante. São exemplos, os projetos dos seguintes aproveitamentos hidroelétricos:

- Alto Lindoso - *Prémio Puente de Alcántara*, atribuído pela Fundación San Benito de Alcántara, em 1994;
- Alqueva - *Prémio Puente de Alcántara*, atribuído pela Fundación San Benito de Alcántara, em 2005;
- Baixo Sabor - *Prémio Secil de Engenharia Civil*, atribuído pela Ordem dos Engenheiros, em 2016;
- Venda Nova III - *VGB Quality Award*, atribuído pela VGB Power Tech, em 2018; *Top Plant Award*, atribuído pela Power Magazine, em 2018; *Prémio Ricardo Esquível Teixeira Duarte*, atribuído, pela SPG em 2018; finalista ao *Prémio ITA Tunnelling Project of the Year 2016*.

Por fim, este artigo constitui também uma homenagem às diversas gerações de profissionais que, nas mais variadas atividades, contribuíram para o sucesso de cada um dos projetos apresentados.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à EDP as facilidades concedidas para a elaboração deste artigo, em particular à EDP Produção e à Fundação EDP, pelo acesso disponibilizado a brochuras, documentos técnicos e fotográficos do seu acervo. Deixam também um agradecimento aos técnicos contactados pela ajuda no avivar de memórias e contributos esclarecedores, decorrentes da sua vivência na execução de algumas das obras aqui apresentadas.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, J. B. C.; Martins, H. F. (1961). *Le Douro International. Travaux souterraines et leur justification*. Septième Congrès des Grands Barrages. Question n° 25, R93.
- Costa, A. F.; Oliveira, M.; Resende, M. E.; Ribeiro, V.; Esteves, C. (2004). *Venda Nova II. Energia renovável, flexível e não poluente*. Engenharia e Vida, n° 1, pp. 32-41.
- EDP-Electricidade de Portugal, EP (1986). *Aproveitamento Hidráulico do Douro*. EDP / EP.
- EDP-Electricidade de Portugal, S.A. (1992). *Centro de Produção Douro*. EDP / DOPR.
- EDP-Electricidade de Portugal, S.A. (1993). *Aproveitamentos Hidroelétricos de Alto Lindoso e Touvedo*. EDP / DOEH.
- EDP-Electricidade de Portugal, S.A. (2001). *Os primeiros grandes aproveitamentos hidroelétricos Castelo do Bode e Venda Nova*. EDP, S. A..
- EDP-Energias de Portugal (2006a). *Os aproveitamentos hidroelétricos de Salamonde e de Caniçada, 50 anos ao serviço da hidroelectricidade e do país*. EDP Produção – GCM.
- EDP-Energias de Portugal (2006b). *Os aproveitamentos hidroelétricos de Cabril e Bouçã. 50 anos ao serviço da hidroelectricidade e do país*. EDP Produção – GCM.
- EDP-Energias de Portugal (2006c). *O aproveitamento hidroelétrico de Paradela. 50 anos ao serviço da hidroelectricidade e do país*. EDP Produção – GCM.
- EDP-Energias de Portugal (2008). *O aproveitamento hidroelétrico de Picote. 50 anos ao serviço da hidroelectricidade e do país*. EDP Produção – GCM.
- EDP-Energias de Portugal (2011a). *Centros Produtores*. EDPP / DPCM.
- EDP-Energias de Portugal (2011b). *O aproveitamento hidroelétrico de Miranda. 50 anos ao serviço da hidroelectricidade e do país*. EDP Produção – GCM.
- EDP Produção (2019). *Dez Anos BARRAGENS*. EDP.
- Esteves, C.; Pinto, P.; Plasencia, N.; Marques, T. (2017). *First filling of hydraulic tunnels of Venda Nova III hydropower scheme*. World Tunnel Congress 2017, ITA-AITES, Bergen, Norway.
- Esteves, C.; Plasencia, N.; Lima, C. (2008). *The Application of FLAC3D on Picote II Underground Powerhouse*. 1st International FLAC/DEM Symposium Minneapolis, USA, pp. 519-527.
- Esteves, C.; Plasencia, N.; Lima, C. (2018). *Conceção e dimensionamento do rolhão superior do circuito hidráulico do reforço de potência de Venda Nova III*. 16º Congresso Nacional de Geotecnia, pp. 809-820, Ponta Delgada.
- Fernandes, L.H.G. (1955). *O aproveitamento hidroelétrico de Salamonde*. Engenharia, n°19 - Publicação dos alunos da Faculdade de Engenharia. FEUP, Porto, pp14-35.
- Ferreira, A.; Sarmiento, C.; Lima, C.; Plasencia, N.; Esteves, C. (2016). *Conceção do revestimento do desarenador superior do reforço de potência de Venda Nova III*. 15º Congresso Nacional de Geotecnia, Porto.
- Figueira, J. (2012). *O estado na eletrificação portuguesa: da lei de eletrificação do país à EDP (1945-1976)*. Dissertação de doutoramento. FEUC.
- Figueiredo, J. N.; Lima, C.; Plasencia, N.; Garrido, S. (2018). *Tratamento da Fundação da Barragem de Foz Tua – Conceção e Resultados*. COBRAMSEG 2018, Salvador, Brasil.

- HICA (1968). *Achegas para a história da Hidro Eléctrica do Cávado*. Electricidade nº 59, pp. 183-192, nº 60, pp 308-314, nº 61, pp 365-373.
- HIDROCENEL (1995). *Um olhar sobre os aproveitamentos hidroeléctricos*. Hidrocenel.
- Liberal, O.; Miranda, M. P.; Monteiro, P.; Paixão, J.; Lima, C.; Moreira, A.P. (2002). *Tratamento de uma zona de falha de grande possança na margem esquerda da barragem de Alqueva*. XII Congresso Brasileiro de Mec. dos Solos e Eng.^a Geotécnica, S. Paulo, Brasil, pp. 1135-1147.
- Lima, C.; Neiva, J. M. C. (1995). *Geotechnics of the Alto Lindoso underground Powerhouse complex (Portugal)*. 8th International Congresso on Rock Mechanics, vol. V, pp. 33-36, Tokyo
- Lima, C.; Resende, M. E.; Plasencia, N.; Esteves, C. (2002). *Venda Nova II Hydroelectric Scheme. Powerhouse Geotechnics and Design*. News Journal of the ISRM, June 2002, pp. 37-40.
- Lima, C.; Plasencia, N.; Esteves, C. (2007). *Picote II Underground Powerhouse – Geotechnical Characterization and Design*. 11th Congress of the ISRM, pp. 991-994, Lisboa.
- Madureira, C.; Baptista, V. (2002). *Hidroelectricidade em Portugal – memória e desafio*. REN-Rede Eléctrica Nacional, S.A..
- Marques, T.; Plasencia, N.; Esteves, C.; Pinto, P.; Oliveira, M. A.; Lima, C. (2017). *The surge shafts of Venda Nova III hydropower plant's surge tank - geological conditions and constructive solutions*. World Tunnel Congress 2017, ITA-AITES, Bergen, Norway.
- Neiva, J. M. C.; Lima, C. (1990). *Engineering geology of the Fronhas tunnel, Portugal*. 6th International IAEG Congress, pp. 2447-2452, Rotterdam.
- Neiva, J. M. C. ; Lima, C.; Plasencia N. (1994). *Diversión Tunnel from Mondego River to the Caldeirão reservoir*. 7th International IAEG Congress, vol. 6, pp. 4287-4296, Lisbon.
- Nunes, J. M. O. (1961). *Les travaux souterrains des aménagements Hydroélectriques de Picote et Miranda. Notes sur leur exécution*. 7^{ème} Congrès des Grands Barrages. Question nº 25, R88.
- Plasencia, N (2014). *Túneis em Portugal*. Comissão Portuguesa de Túneis, Lisboa, pp 347-425.
- Plasencia, N.; Carvalho, J.M.; Cavaco, T. (2015). *Groundwater monitoring impacts of deep excavations: hydrogeology in the Venda Nova repowering schemes (NW Portugal)*. Environ Earth Sci 73, 2981–2995 (2015). <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3942-x>
- Plasencia, N.; Lima, C. (2003). *Contribuição da geologia de engenharia no empreendimento de Venda Nova II*. Geologia de Eng.^a e os Recursos Geológicos, vol. 1 pp. 185-198, Coimbra.
- Queralt, M.; Esteves, C.; Lima, C. (2013). *Simulação numérica da escavação faseada da central do aproveitamento hidroeléctrico de Venda Nova III*. Congress on Numerical Methods in Engineering. Bilbao.
- Sarmiento, M. M.; Andrade, A.; Lima, C. (2018). *Aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor.. Central e circuitos hidráulicos do Baixo Sabor*. Encontro Nacional de Betão Estrutural – BE2018. Lisboa.