



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONFIDENCIAL

BACIA DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA DA BARRAGEM DO FUNCHO

**Avaliação do funcionamento hidráulico e do estado
de degradação do betão armado. Recomendações
complementares para a elaboração do projeto
e empreitada de reabilitação**



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

CONFIDENCIAL

BACIA DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA DA BARRAGEM DO FUNCHO

**Avaliação do funcionamento hidráulico e do estado
de degradação do betão armado. Recomendações
complementares para a elaboração do projeto
e empreitada de reabilitação**

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

Lisboa • outubro de 2016

I&D MATERIAIS

RELATÓRIO 296/2016 – DM/NBPC

Título

BACIA DE DISSIPACÃO DE ENERGIA DA BARRAGEM DO FUNCHO

Avaliação do funcionamento hidráulico e do estado de degradação do betão armado.

Recomendações complementares para a elaboração do projeto e empreitada de reabilitação

Autoria

DEPARTAMENTO DE MATERIAIS

Maria Sofia Coelho Costa e Sousa Ribeiro

Investigadora Auxiliar, Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E AMBIENTE

José Falcão de Melo

Investigador Auxiliar, Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas

Copyright © LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, I. P.

AV DO BRASIL 101 • 1700-066 LISBOA

e-mail: lnec@lnec.pt

www.lnec.pt

Relatório 296/2016

Proc. 0403/121/08807, 0202/121/0880703, 0605/121/0880704

BACIA DE DISSIPAÇÃO DE ENERGIA DA BARRAGEM DO FUNCHO

Avaliação do funcionamento hidráulico e do estado de degradação do betão armado.
Recomendações complementares para a elaboração do projeto e empreitada de reabilitação

Resumo

Relatório de análise das condições de deterioração generalizada da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho, com especial ênfase na avaliação do funcionamento hidráulico e do estado de degradação do betão armado, tendo em vista a produção de recomendações complementares para a elaboração do projeto e empreitada de reabilitação.

Palavras-chave: Descarregador de cheias / Bacia de dissipação de energia / Betão armado / Erosão por abrasão / Ataque químico / Reparação / Reabilitação

FUNCHO DAM PLUNGE POOL

Assessment of plunge pool deterioration and reinforced concrete condition.
Recommendations for the repair and rehabilitation project

Abstract

This report assesses the general deterioration of the plunge pool of Funcho Dam, with special emphasis on the assessment of hydraulic operation and reinforced concrete degradation conditions. The main purpose of the report is the establishment of guidelines and recommendations applicable to the design and the rehabilitation works.

Keywords: Spillway / Stilling basin / Reinforced concrete / Abrasion erosion / Chemical attack / Repair / Rehabilitation

Índice

1	Introdução	1
2	Caracterização da bacia de dissipação de energia	4
2.1	Órgãos de descarga – conceção e funcionamento hidráulico.....	4
2.2	Características da bacia de dissipação	5
2.2.1	Características geométricas	5
2.2.2	Composição do betão	6
3	Ações hidrodinâmicas no fundo da bacia de dissipação	8
3.1	Magnitude das ações hidrodinâmicas	8
3.2	Localização do ponto de estagnação dos jatos.....	11
3.3	Estabilidade das lajes do fundo da bacia de dissipação	14
3.4	Turbulência residual a jusante da bacia de dissipação	16
4	Avaliação da degradação do betão armado da bacia de dissipação	18
4.1	Nota prévia sobre a degradação da bacia.....	18
4.2	Classe de exposição ambiental	19
4.3	Descrição das anomalias visíveis.....	20
4.4	Níveis de degradação do betão.....	22
4.5	Causas da degradação do betão.....	22
4.6	Ensaio realizados no local	23
4.6.1	Profundidade de carbonatação do betão.....	23
4.6.2	Resistência superficial do betão	23
4.7	Conclusões relativas à degradação do betão armado	24
5	Recomendações complementares para o projeto e empreitada de reabilitação.....	26
5.1	Alguns aspetos essenciais para a eficácia da reparação.....	26
5.2	Aspetos de carácter geral a ter em consideração na reparação.....	26
5.3	Ensaio a realizar no local antes da reabilitação.....	27
5.3.1	Agressividade química da água da bacia	27
5.3.2	Profundidade de carbonatação do betão.....	27
5.3.3	Resistência mecânica do betão	28
5.3.4	Resistência ao desgaste por abrasão do betão	28
5.4	Recomendações relacionadas com a reparação do betão armado	28
5.4.1	Remoção de betão.....	28
5.4.2	Preparação das superfícies das armaduras e do betão expostas	29
5.4.3	Reforço/Substituição das armaduras e do Sistema de Estanquidade das juntas de contração.....	30
5.4.4	Colocação e cura do betão de reparação.....	30
5.4.5	Especificação do betão de reparação	31
5.4.6	Seleção do Sistema de Estanquidade	32
5.4.7	Recobrimento mínimo das armaduras.....	32
5.4.8	Controlo de qualidade na aplicação do Sistema de Estanquidade das juntas de contração da laje de fundo.....	32
5.4.9	Controlo de qualidade na aplicação do betão de reparação	32
5.5	Recomendações para proteger a obra até se realizar a reparação	34
5.6	Síntese das recomendações para o projeto e empreitada.....	34
6	Conclusões.....	36
	Referências	38
	ANEXO – Desenhos e reportagem fotográfica da inspeção de 2015-10-28	41

Índice de figuras

Figura 3.1 – Trajetórias dos jatos para $Nm=NPA=96,00$ m (estimadas analiticamente ao eixo do jato e admitindo aberturas iguais das comportas para o cálculo dos níveis críticos a jusante)	12
Figura 3.2 – Trajetórias dos jatos para $Nm=76,00$ m (estimadas analiticamente ao eixo do jato e admitindo aberturas iguais das comportas para o cálculo dos níveis críticos a jusante)	12
Figura 3.3 – Orifícios em funcionamento em março de 2013 para abertura de comportas de cerca de 25%, $Nm=92,64$ m e cota (44,24) na albufeira do Arade	14
Figura 3.4 – Esquema de transmissão de pressão dinâmica à fundação por fissura ou junta de contração com estanquidade inoperacional	15

Índice de quadros

Quadro 2.1 – Composições, por metro cúbico, dos betões aplicados na bacia de dissipação de energia	7
Quadro 2.2 – Características dos betões aplicados na bacia de dissipação de energia	7
Quadro 3.1 – Cotas do nível de água na albufeira aquando das inspeções de especialidade Ata Nº1 (2003) à Ata Nº11 (2013)	8
Quadro 3.2 – Estimativa das forças estabilizadoras e instabilizadoras numa laje de fundo em situação de rotura de “ <i>waterstop</i> ” e de drenagem inoperacional	16
Quadro 4.1 – Compilação da informação relativa à análise química da água da albufeira (LNEC, 1993 e 1996 e resultados de observações hidroquímicas)	20

1 | Introdução

Nas visitas de especialidade realizadas nos últimos anos, no âmbito do Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), à Barragem do Funcho, têm sido referidas evidências de anomalias no funcionamento hidráulico e no estado do betão armado da bacia de dissipação. Nesse sentido, a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), na sua qualidade de dono de obra, solicitou ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) a elaboração de um estudo de suporte à preparação de uma intervenção para reparação dessa bacia. No seguimento desse pedido, o Núcleo de Observação (NO), do Departamento de Barragens de Betão (DBB), responsável, no LNEC, pelo acompanhamento da obra nos termos do RSB, solicitou a colaboração do Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas (NRE), do Departamento de Hidráulica e Ambiente (DHA), e do Núcleo de Betões, Pedra e Cerâmicos (NBPC), do Departamento de Materiais (DM), para a avaliação do funcionamento hidráulico da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho e para a caracterização do estado de degradação do betão armado da bacia deste órgão de segurança, tendo em vista a indicação de recomendações complementares para a elaboração do projeto e empreitada de reabilitação.

A Barragem do Funcho localiza-se na ribeira do Arade, cerca de 3,5 km a montante da Barragem do Arade, no concelho de Silves, Algarve. Trata-se de uma barragem em abóbada de betão com cerca de 50 m de altura máxima e 210 m de desenvolvimento de coroamento, o qual se situa à cota (99,80). A sua construção decorreu entre 1988 e 1991.

Como base para a elaboração do presente relatório, foi recolhida a seguinte informação:

- elementos obtidos na visita ao local em 2015-10-28, integrada na equipa de especialidade à Barragem do Funcho, designadamente relativos,
 - às atuais condições de exploração da barragem, envolvendo o funcionamento dos orifícios do descarregador;
 - ao estado de degradação do betão armado da bacia de dissipação;
 - ensaios “*in-situ*” do estado do betão armado;
- documentos e peças desenhadas dos arquivos da APA e do LNEC;
- relatórios do LNEC produzidos nas fases de projeto, de construção e de observação da barragem (LNEC, 1987, 1982, 1993, 1996, 2001);
- registos no âmbito das visitas de inspeção de especialidade, designadamente
 - as atas das visitas de inspeção (ATA Nº1, 2003 à ATA Nº11, 2013);
 - fotografias de 1996 (arquivo da APA);
 - fotografias de 2004 e 2013 (do arquivo do LNEC);
- resultados de observações hidroquímicas em suporte informático (Excel).

Na data da visita efetuada pela equipa do LNEC, em 2015-10-28, a bacia de dissipação de energia encontrava-se com água ligeiramente acima da soleira do degrau de saída (Figuras A.11), não tendo por isso sido possível observar o estado da zona imersa, que é a mais sujeita às ações hidrodinâmicas aquando da operação dos orifícios do descarregador e que, de acordo com inspeções visuais feitas a seco, evidencia sinais de degradação.

Este relatório apresenta:

- no que respeita ao “funcionamento hidráulico” da bacia de dissipação de energia,
 - descrição das características gerais dos órgãos de segurança e exploração;
 - estimativa das ações hidrodinâmicas no fundo da bacia de dissipação;
 - avaliação da estabilidade das lajes de fundo da bacia de dissipação;
 - análise genérica das condições de condições de restituição do escoamento a jusante;
- no que respeita ao betão armado da bacia de dissipação de energia,
 - a classe de exposição ambiental em que se insere o betão armado;
 - a descrição das anomalias visíveis com base na informação recolhida na inspeção realizada em 2015;
 - a apreciação do estado atual de degradação do betão, com base na informação obtida na inspeção de 2015 e confrontada com a acessível e recolhida nas anteriores inspeções, tendo sido definidos e localizados dois níveis de degradação do betão armado;
 - as possíveis causas da degradação observada no betão armado;
 - ensaios realizados e a realizar no local antes da reabilitação;
 - recomendações de estratégias de intervenção em função de cada nível de degradação, no sentido de repor as condições de projeto;
 - propostas de especificações a considerar na seleção dos materiais de reparação a usar na reabilitação;
- no que respeita a conclusões e recomendações apresentadas, foram conciliados os resultados das análises relativas ao funcionamento hidráulico e ao estado de degradação do betão armado da bacia de dissipação de energia.

Saliente-se que não são objeto deste relatório os restantes locais da barragem, apesar da degradação do betão armado ser visível em diversos locais da obra.

O Anexo inclui os desenhos do projeto da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho e fotografias colhidas nas inspeções realizadas em 1996, 2004, 2013 e 2015, fornecidos pela APA e pelo Departamento de Barragens de Betão do LNEC (DBB).

De modo a clarificar a terminologia usada ao longo do texto neste relatório, referem-se algumas definições de acordo com os glossários sobre terminologia do cimento e betão, elaborados pelo *American Concrete Institute*, ACI CT-13, *Concrete Terminology* e pelo *International Concrete Repair Institute*, ICRI-2010. Assim:

- por erosão do betão, entende-se a deterioração do betão resultante da interação mecânica da sua superfície com um fluido, um fluido multicomponente ou partículas sólidas transportadas pelo fluido;
- por cavitação, entende-se o colapso de bolhas de vapor que se formam no fluxo de água em áreas de baixa pressão quando entram em áreas de pressão mais elevada;
- por resistência à abrasão do betão, entende-se a capacidade da superfície do betão resistir à fricção ou ao polimento.

São utilizadas ao longo do documento as seguintes siglas, cujo significado se antecipa:

- *Nm* – cota da superfície livre a montante, na albufeira;
- *Nj* – cota da superfície livre a jusante da estrutura de dissipação de energia;
- *NMC* – nível de máxima cheia, correspondente à cota (97,15) na albufeira do Funcho e à cota (61,00) na albufeira do Arade;
- *NPA* - nível de pleno armazenamento, correspondente à cota (96,00).

2 | Caracterização da bacia de dissipação de energia

2.1 Órgãos de descarga – conceção e funcionamento hidráulico

As estruturas de descarga de cheias da Barragem do Funcho são constituídas por duas descargas profundas de grande capacidade de vazão e por um descarregador de superfície, que funciona em lâmina livre (Figuras A.12 e A.24).

Os escoamentos provenientes quer dos orifícios profundos, quer do descarregador de superfície, são dirigidos para uma bacia de dissipação de energia de betão armado, localizada no pé da barragem (Figuras A.1, A.11 e A.24). Esta estrutura destina-se a proteger a fundação da barragem e os taludes das encostas das margens das erosões que, inevitavelmente, se produziriam caso a ação hidrodinâmica do escoamento incidisse diretamente sobre o leito natural.

Com a conceção adotada para os órgãos de descarga de cheias, pretendeu-se cumprir com os seguintes objetivos hidráulico-operacionais:

- proporcionar um amortecimento significativo do caudal de ponta das cheias afluentes, sendo que, para a cheia de projeto (período de retorno de 500 anos), a um caudal afluente máximo de cerca de $730 \text{ m}^3/\text{s}$, corresponde um caudal efluente máximo de apenas $330 \text{ m}^3/\text{s}$;
- possibilitar que o primeiro enchimento da albufeira, que corresponde a um período particularmente crítico em termos de segurança da obra, fosse feito de forma controlada e respeitando os patamares previstos para o nível de água na albufeira;
- permitir uma gestão dos volumes armazenados na albufeira do Funcho (volume máximo de $45 \times 10^6 \text{ m}^3$) através da possibilidade de transferência de volumes importantes para a albufeira do Arade, a qual possui uma capacidade de armazenamento muito inferior ($0,65 \times 10^6 \text{ m}^3$).

Não havendo limitação à operação das comportas dos orifícios profundos (situação excecional), a cheia de projeto pode ser escoada (abertura total das comportas) sem ser excedido o NPA (cota 96,00 m).

Em caso de impedimento de operação de uma das comportas (total ou parcial) durante uma cheia significativa, o descarregador de superfície entra em funcionamento uma vez ultrapassado o NPA na albufeira. Sob tais condições, a cheia de projeto escoar-se com o nível na albufeira situado entre o NPA e o NMC (cota 97,15 m).

Os jatos produzidos pelos descarregadores profundos são dirigidos para baixo à saída dos orifícios e apresentam uma trajetória na atmosfera muito curta. Neste tipo de solução a dissipação da energia cinética do escoamento processa-se essencialmente no seio do colchão de água na bacia de dissipação de duas formas distintas:

- antes de ocorrer deflexão dos jatos pelo fundo da bacia - dissipação por difusão dos jatos ao longo do percurso através do colchão de água na bacia de dissipação, sendo que tal dissipação só é eficaz se o colchão possuir uma espessura adequada;
- após a deflexão pelo fundo, dissipação através da macroturbulência do escoamento no colchão de água no interior da bacia.

A jusante da bacia de dissipação, foi prevista a proteção do leito do rio com um tapete de proteção em enrocamento (Figuras A.5, A.7, A.11), cuja definição da dimensão mediana dos blocos foi estabelecida com base em ensaios em modelo hidráulico reduzido LNEC (1987 e 1992). Em relação a esta proteção, interessa referir que nos estudos em modelo não se procedeu à análise das erosões das encostas, dado que se admitiu, então, que as formações geológicas destas tinham resistência adequada para resistir à ação do escoamento, sendo que se teria que verificar a validade desta hipótese “in-situ” aquando da construção. Entretanto, por se ter constatado no decorrer da obra que a resistência das formações geológicas era inadequada, foi decidida também a colocação de enrocamento, não apenas no leito do canal, mas também nos taludes das margens.

2.2 Características da bacia de dissipação

2.2.1 Características geométricas

As características da bacia de dissipação de energia referida neste relatório foram obtidas com base nos desenhos de projeto, designadamente os constantes em LNEC (1987 e 1992).

A bacia de dissipação de energia é assimétrica em planta, tendo cerca de 45 m na zona mais comprida e cerca de 50 m de largura. Na Figura A.1 apresenta-se a planta da bacia, destacando-se a representação das juntas de contração dos elementos de betão armado e da rede de drenagem.

O fundo da bacia é horizontal, à cota (51,50), (Fig. A.1), e materializado por quatro lajes de betão armado, três delas com dimensões em planta aproximadamente retangulares (15 m x 13 m), apresentando a quarta laje uma menor dimensão na direção longitudinal e uma geometria aproximadamente trapezoidal.

As lajes de fundo da bacia:

- têm 1,5 m de espessura;
- apresentam juntas de contração munidas de um sistema vedante (“*waterstop*”) ao longo do seu contorno (Fig.A.2), destinado a impedir a transmissão das pressões dinâmicas à fundação;
- são armadas na face superior através de uma malha quadrada de varões $\phi 20$ afastados de 30 cm, Fig. A.2;
- estão solidarizadas à fundação através de pregagens, com varões de aço de $\phi 25$ afastados de 3 m e com uma entrega de 6 m na fundação rochosa, Fig. A.4.

Ainda de acordo com os elementos de projeto consultados, a fundação da bacia de dissipação de energia está munida de:

- um sistema de drenagem, composto por uma malha quadrangular de drenos de secção semicircular $\phi 400$ (1/2 tubo de betão), espaçados entre si de 3 m (Figuras A.1 e A.3), que permitem aliviar eventuais subpressões transmitidas à fundação através de zonas da estanquidade das juntas de contração que se encontrem defeituosas ou danificadas;
- um poço de drenagem a montante, localizado na fundação da barragem (Figura A.1), para recolha dos volumes de água eventualmente intersetados pelo sistema de drenagem da fundação da bacia.

As paredes laterais da bacia, de betão armado, apresentam uma inclinação de 1:1 e elevam-se até à cota (61,50), Figuras A.6 e A.8. Já as paredes de jusante, que limitam lateralmente a saída da bacia de dissipação, estrangulando-a, têm uma inclinação de 1:0.25 (V:H), Figura A.5.

O degrau de saída da bacia de dissipação tem a soleira à cota de (54,00) e a face de montante com uma inclinação de 1:1, Figura A.7.

2.2.2 Composição do betão

Da consulta dos vários documentos a que se teve acesso, foi recolhida informação sobre a qualidade dos betões aplicados na bacia, que se apresenta nos Quadros 2.1 e 2.2.

Como mostra o Quadro 2.1, foram aplicadas na construção da bacia as composições 7ª e 8ª. Nestas composições foram utilizados dois agregados grossos, de natureza calcária, fornecidos pela empresa Manuel Rodrigues, de Estômbar; e, um agregado fino, a areia de Sta. Margarida do Sado, devido às dificuldades encontradas com as areias de Estômbar (areias 1 e 2) no que respeita ao teor de argila.

Na 7ª composição, a máxima dimensão do agregado grosso foi de 150 mm, enquanto na 8ª composição foi de 38 mm, por ser a composição usada para betonagens de peças armadas.

Em ambas as composições o ligante usado foi o cimento Portland com adição de cinzas volantes, da Central Térmica de Sines, de 21% e de 25%, respetivamente, na 7ª e 8ª composição. A relação água-cimento da 7ª composição foi de 0,50.

O Quadro 2.2 mostra um resumo das características, nos estados fresco e endurecido, dos betões aplicados na bacia (LNEC, 1993). Observa-se para a 7ª composição, os valores médio e característico da resistência à compressão do betão aos 28 dias de idade, respetivamente, de 18,5 MPa e 12,9 MPa; e, aos 90 dias, de 25,6 MPa e 18,5 MPa. Para a 8ª composição apenas se teve acesso ao valor médio da resistência à compressão aos 28 dias e 90 dias, respetivamente, de 22,1 MPa e de 31,1 MPa.

Quadro 2.1 – Composições, por metro cúbico, dos betões aplicados na bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho (LNEC, 1993)

Componentes		Composições de Betão	
		7 (LNEC)	8 (LNEC)
Agregado grosso britado e de natureza calcária (Estômbur)	150 / 75	844	-
	38 / 19	398	872
	10 / 5	347	430
Agregado fino	Areia do Sado	521	638
Ligante	CPN 30	190	225
	Cinzas volantes (Sines)	50	75
	CPN / Cinzas	79/21	75/25
Água		120	-
Água / Ligante		0,50	-

Quadro 2.2 – Características dos betões aplicados na bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho (LNEC, 1993)

Características do betão	Composições	
	7 (LNEC)	8 (LNEC)
Abaixamento (cm)	8	6
Resistência à compressão aos 7 dias (cubos de 200x200x200mm ³)		
Valor médio (MPa)	11,7	14,0
Coef. de variação (%)	24	-
Tensão característica (MPa)	7	-
Resistência à compressão aos 28 dias (cubos de 200x200x200mm ³)		
Valor médio (MPa)	18,8	22,1
Coef. de variação (%)	19	-
Tensão característica (MPa)	12,9	-
Resistência à compressão aos 90 dias (cubos de 200x200x200mm ³)		
Valor médio (MPa)	25,6	31,1
Coef. de variação (%)	17	-
Tensão característica (MPa)	18,5	-
Coeficiente de permeabilidade (cm/h)	< 10 ⁻⁷	

3 | Ações hidrodinâmicas no fundo da bacia de dissipação

3.1 Magnitude das ações hidrodinâmicas

O descarregador de cheias da Barragem do Funcho tem a característica particular de, além de se destinar às suas funções de órgão de segurança, permitindo a passagem em segurança das afluições de cheias para jusante, também funcionar como órgão de exploração, no sentido em que a sua operação permite a gestão da água entre a albufeira própria e a albufeira da barragem do Arade.

Se o funcionamento em situação de cheia é, pela sua natureza, pouco frequente, sendo mesmo reduzida a probabilidade de operação com caudais próximos do caudal de dimensionamento, cujo período de retorno é de 500 anos, já o funcionamento para efeitos de gestão dos volumes de água em articulação com a barragem do Arade é frequente (múltiplas vezes por ano).

Ora sucede que, em termos da magnitude das ações hidrodinâmicas produzidas pelo escoamento na bacia de dissipação de energia, as situações produzidas pelas descargas de cheia e pelas descargas para as transferências de volumes entre albufeiras são análogas. De facto, para quaisquer destas situações, as velocidades do escoamento à saída dos orifícios são da mesma magnitude, uma vez que a carga hidráulica sobre o eixo dos orifícios apresenta uma variação pequena entre os níveis de exploração habituais e o NPA. Vejam-se no Quadro 3.1 as cotas do nível de água na albufeira (Nm) nas datas das diversas inspeções de especialidade entre 2003 e 2013 - valores retirados da Ata Nº1 (2003) à Ata Nº11 (2013) e que se sintetizam, tendo o nível variado entre as cotas extremas (77,90) e (92,84).

Recorrendo à lei de vazão dos orifícios, pode estimar-se que a velocidade dos jatos produzidos sob estas cotas do nível de água na albufeira varia entre cerca de 17 e 22 m/s. Já para a situação de cheia com albufeira à cota (96,00), se estima que a velocidade do escoamento à saída dos orifícios seja de cerca de 25 m/s. Constatam-se pois que, independentemente da razão para as descargas com os orifícios profundos ser a ocorrência de cheias ou decorrer das necessidades da exploração normal, as velocidades do escoamento são sempre elevadas – entre 17 e 25 m/s.

Nestas circunstâncias ocorre a transmissão da pressão dinâmica na vizinhança da junta danificada à face inferior das lajes e, conseqüentemente, o risco de instabilização destas devido à instalação de valores de subpressão que podem ser muito elevados.

**Quadro 3.1 – Cotas do nível de água na albufeira aquando das inspeções de especialidade
Ata Nº1 (2003) à Ata Nº11 (2013)**

Data	Jan 2003	Mar 2004	Nov 2005	Nov 2006	Jul 2007	Dez 2008	Out 2009	Mar 2010	Out 2011	Mar 2012	Mar 2013
Nm	90,85	89,17	77,90	92,2	89,8	83,76	78,33	92,45	85,40	81,40	92,84

Sucedem que, em condições de transferências de volumes para alimentar a albufeira do Arade, é natural que a operação se dê com níveis a jusante (N_j) baixos (ou não seria de esperar haver necessidade para se proceder à transferência de volumes de água entre as albufeiras), sendo o cenário mais desfavorável aquele em que os níveis de água na albufeira do Arade são tais que não impõem qualquer controlo hidráulico ao escoamento no canal de restituição do Funcho. Nessas circunstâncias, os níveis de água dentro da bacia de dissipação de energia serão determinados pelas condições críticas de escoamento impostas pelo degrau de saída da bacia, ou seja, a altura de escoamento sobre o degrau de saída (h_s) corresponde à altura crítica do escoamento nessa secção (ver esquema na página 11). Estas circunstâncias levam a que a velocidade incidente no fundo da bacia de dissipação a jusante possa ser mais elevada em exploração normal do que em situação de cheia e, conseqüentemente, que as ações hidrodinâmicas produzidas na bacia de dissipação de energia sejam mais severas em exploração normal. Tal decorre do fato de a espessura do colchão de água na bacia de dissipação (D_{col}) ser menor em situações de operação normal do que em situações de cheia.

Para demonstrar o acima exposto, apresentam-se no Quadro 3.2 os resultados de cálculos aproximados das velocidades junto ao fundo da bacia com base em recomendações da literatura (Melo 2001). Dos valores apresentados no quadro, verifica-se que as velocidades no impacto com o colchão a jusante (V_o) não são atenuadas ao longo do percurso submerso do jato na maioria dos cenários simulados, ou seja, nesses casos a pressão dinâmica máxima do jato no fundo não será amortecida.

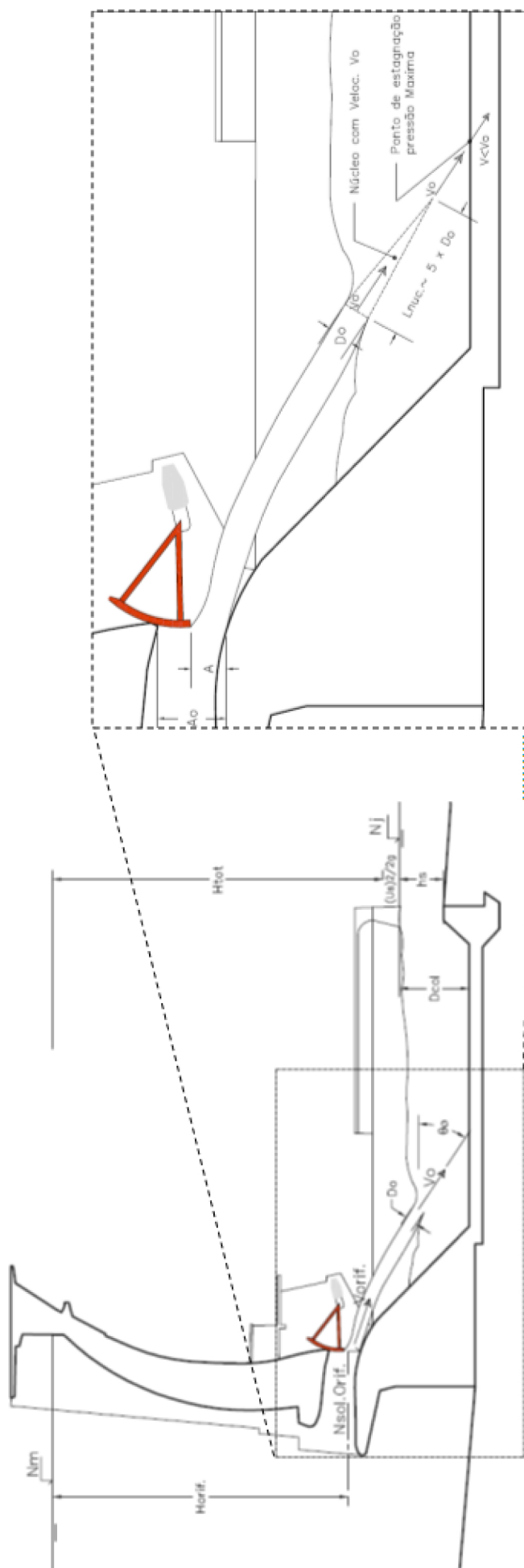
Apenas em três dos casos analisados, todos eles associados ao funcionamento em cheia ($N_m=NPA$), se verifica alguma atenuação da pressão dinâmica máxima entre a secção de impacto e o fundo da bacia de dissipação. O caso que conduz a uma maior atenuação corresponde ao de caudal de cheia de projeto ($Q_{tot}=334 \text{ m}^3/\text{s}$) e albufeira do Arade à cota do NMC (61,00). Com efeito, para este caso, a existência de um colchão de água mais espesso na bacia de dissipação ($D_c \approx 6,9 \text{ m}$) permite obter uma redução da altura cinética do jato, que na secção de impacto com a superfície livre do colchão é $E_o \approx 31,2 \text{ m}$ e no ponto de estagnação no fundo da bacia é de $p_{max}/\gamma = 20,8 \text{ m}^1$. Esta redução corresponde a uma atenuação da pressão dinâmica máxima de cerca de 35 %.

Para todos os casos em relação aos quais se admitiu descargas com níveis na albufeira francamente abaixo do NPA ($N_m=76,00 \text{ m}$) e saída da bacia de dissipação em condições de regime crítico, ou seja, correspondentes a situações de exploração normal, constatou-se ser a espessura do colchão (D_c) insuficiente para atenuar na zona do fundo a velocidade do jato (V_o) ou a sua energia cinética (E_o) na secção de entrada do colchão. Quer isto dizer que nestas condições não se consegue obter qualquer atenuação da pressão dinâmica máxima no fundo da bacia.

¹ γ – peso volúmico da água.

Quadro 3.2 – Estimativa aproximada das características dos jatos em função da abertura de comporta, do nível a montante e do nível a jusante

Situação simulada	Dados Gerais					Variáveis de cálculo - saída do orifício desc.				Variáveis de cálculo - impacto no colchão					Var. cálc. - Zona submersa		Atenuação energ. entre o impacto no colchão e o fundo da bacia $1-\{(p_{max}/\gamma)/E_o\}$ (%)			
	Nm (m)	Nj (m)	N _{orif} (m)	Q _{tot} (m ³ /s)	Q _{orif.} (m ³ /s)	Abertura A (m)	Abert.Rel. A/A _o (%)	A _c (C _c =0.87) (m ²)	H _{orif.} (C _v =0.915) (m/s)	H _{bat} (m)	Dc (m)	Do (m)	θ _o (graus)	Vo (m/s)	Eo (m)	L _{sub.} (m)		L _{nuc.} (m)	p _{max} /γ (m.c.a.)	
Cheia e Nj máximo	96.00	61.00	61.5	334	167	3.44	100%	6.89	29.99	24.25	35.00	9.50	2.91	24.94	25.12	32.16	22.53	14.55	20.77	35%
Situação de Cheia e Nj crítico na saída	58.24	57.55	61.5	334	167	3.44	100%	6.89	29.99	24.25	37.76	6.74	2.85	29.55	26.18	34.93	13.66	14.25	34.93	0%
	96.00	57.55	61.5	250	125	2.59	75%	5.18	30.38	24.40	38.45	6.05	2.46	29.84	26.43	35.60	12.15	12.30	35.60	0%
	56.76	56.76	85	170	85	1.73	50%	3.46	30.78	24.56	39.24	5.26	2.01	30.20	26.69	36.31	10.47	10.05	34.86	4%
	55.77			86	43	0.87	25%	1.74	31.17	24.72	40.23	4.27	1.42	30.85	27.04	37.27	8.33	7.10	31.75	15%
Sit. de Exploração e Nj crítico na saída	57.15	57.15		208	104	3.44	100%	6.89	11.69	15.14	18.85	5.65	2.67	40.39	18.65	17.73	8.72	13.35	17.73	0%
	76.00	56.66	61.5	160	80	2.59	75%	5.18	12.08	15.39	19.34	5.16	2.31	40.17	18.91	18.23	8.00	11.55	18.23	0%
	56.06	56.06		108	54	1.73	50%	3.45	12.48	15.64	19.94	4.56	1.89	40.12	19.2	18.79	7.07	9.45	18.79	0%
	55.31			54	27	0.87	25%	1.74	12.87	15.88	20.69	3.81	1.53	40.36	19.57	19.52	5.88	7.65	19.52	0%



3.2 Localização do ponto de estagnação dos jatos

O local da bacia onde se produz deflexão dos jatos pelo fundo, ou seja, onde se aplica a máxima pressão dinâmica (ponto de estagnação, conforme indicado no esquema da página 11), é relevante, dado que a presença das juntas de contração entre as lajes constitui uma zona sensível a este parâmetro do ponto de vista hidráulico. Se a estanquidade das juntas apresentar algum defeito construtivo ou estiver danificada, passa a haver continuidade hidráulica entre o escoamento na bacia e a fundação desta. Nestas circunstâncias, ocorre a transmissão da pressão dinâmica na vizinhança da junta danificada para a face inferior das lajes e, conseqüentemente, alteram-se as condições de estabilidade das lajes face ao funcionamento previsto na sua conceção caso os valores de subpressão sejam muito elevados.

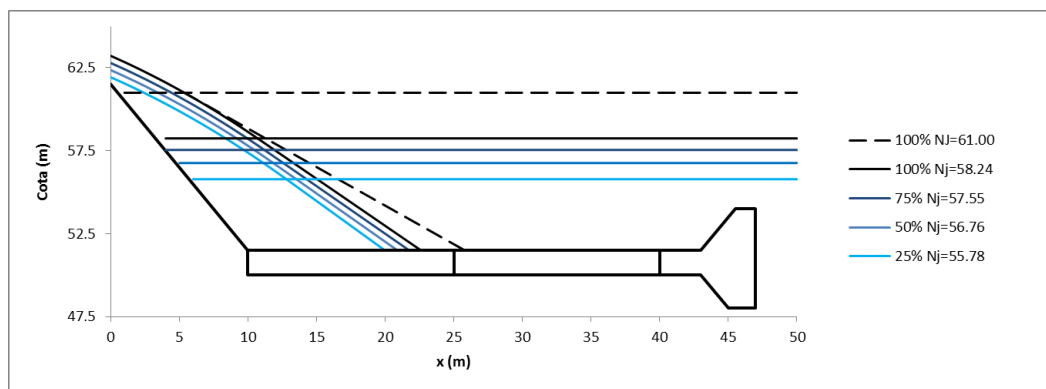
Cálculos expeditos com base nas recomendações da literatura sobre a trajetória de jatos livres e submersos sintetizadas em Melo (2001) permitiram estimar por via analítica a localização do ponto de estagnação para cada uma das situações de funcionamento incluídas no Quadro 3.2.

Procedeu-se à representação na Figura 3.1 e na Figura 3.2 das trajetórias obtidas pelos referidos cálculos (a eixo do jato) e representou-se ainda, esquematicamente, a localização das lajes e das juntas de contração transversais que as separam. Dado que a bacia de dissipação apresenta assimetria em planta, procedeu-se à análise separada para os orifícios esquerdo e direito.

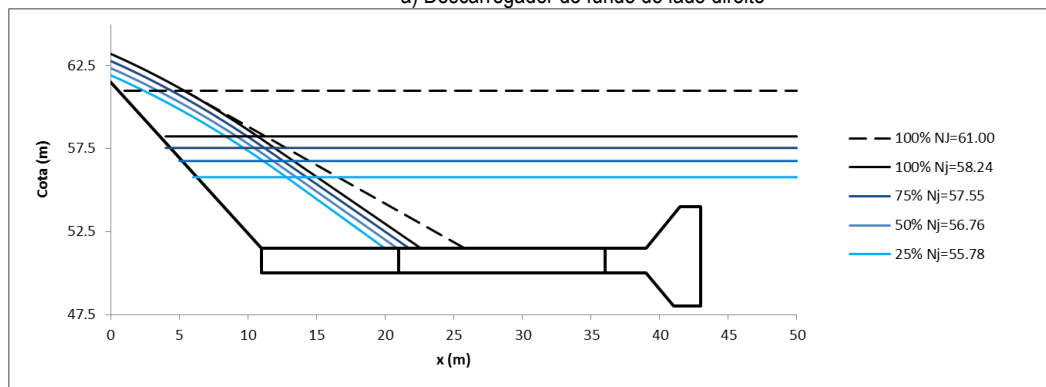
Constata-se dos gráficos que a junta de contração transversal entre as lajes está particularmente exposta aos escoamentos provenientes do orifício descarregador do lado esquerdo, designadamente para situações de níveis na albufeira mais próximos do pleno armazenamento. Contudo, esta junta fica também bastante exposta ao escoamento do orifício do lado direito aquando de descargas em situações de cheia, ou seja, para *NMC* e níveis a jusante próximos da cota (61,00).

Refira-se a este respeito que os ensaios conduzidos pelo LNEC em modelo reduzido relativos à caracterização das pressões no fundo da bacia (LNEC 1987 e 1992) apenas incidiram na zona de impacto do jacto do orifício descarregador do lado direito. Acresce que foi considerada uma rede de pontos de medição relativamente esparsa. Por esta razão, não houve garantia de que, em cada situação ensaiada, o ponto de estagnação tenha coincidido com um dos pontos de medição da pressão dinâmica. Ainda assim, considera-se que, apesar das limitações dos resultados experimentais no tocante à determinação da pressão dinâmica máxima no fundo, foi feita a comparação desses resultados com os da abordagem analítica atrás apresentada. Da comparação verifica-se que em termos de:

- localização das zonas com pressões dinâmicas mais elevadas, há uma concordância razoável dos resultados
- do valor máximo da pressão dinâmica média no fundo da bacia de dissipação, o valor medido no modelo foi de cerca de 15 m.c.a., ou seja, cerca de metade do valor estimado analiticamente.

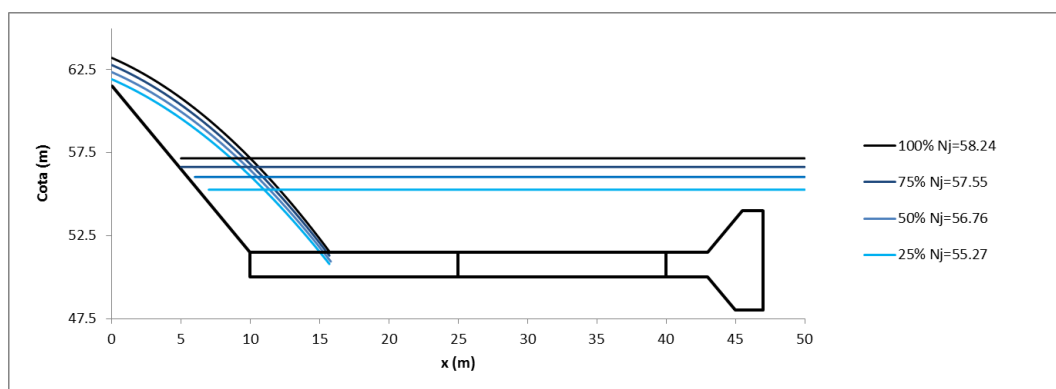


a) Descarregador de fundo do lado direito

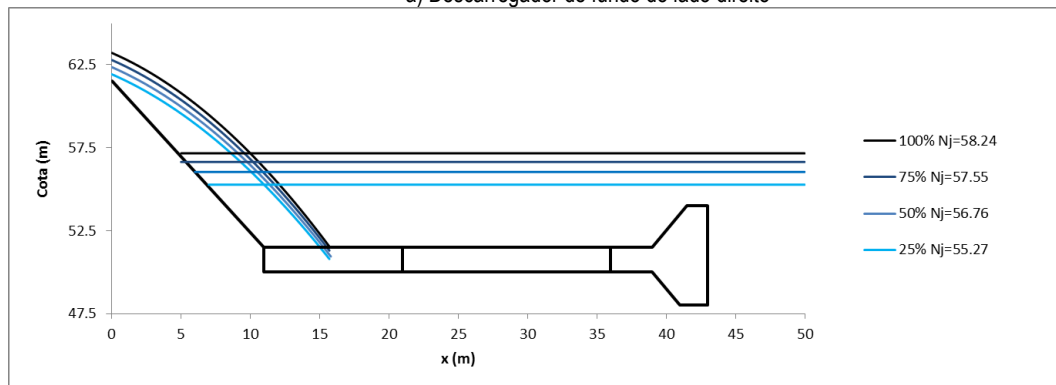


b) Descarregador de fundo do lado esquerdo

Figura 3.1 – Trajetórias dos jatos para $Nm=NPA=96,00$ m (estimadas analiticamente ao eixo do jato e admitindo aberturas iguais das comportas para o cálculo dos níveis críticos a jusante)



a) Descarregador de fundo do lado direito



b) Descarregador de fundo do lado esquerdo

Figura 3.2 – Trajetórias dos jatos para $Nm=76,00$ m (estimadas analiticamente ao eixo do jato e admitindo aberturas iguais das comportas para o cálculo dos níveis críticos a jusante)

O número limitado de pontos de medição no modelo é a mais provável origem das diferenças entre as abordagens dos valores máximos da pressão dinâmica, uma vez que, para jatos submersos não totalmente desenvolvidos (como é o caso) o decaimento espacial das pressões na vizinhança do ponto de estagnação é muito rápido, sendo por isso expectável que, nos diferentes ensaios, nenhuma tomada piezométrica (usadas para medir as pressões médias) ou transdutor de pressão (usados para medir as flutuações de pressão) tenham coincidido com o ponto de estagnação do jato. Por esta razão, o modelo pode não ter permitido a captação experimental dos valores máximos da pressão no fundo.

Na Figura 3.3 apresenta-se uma fotografia do descarregador em funcionamento para uma cota a montante de 3,3 m abaixo da cota do *NPA* e aberturas de comportas de 25% (visita de inspeção de março de 2013), sendo que se trata de uma situação semelhante à indicada na Figura 3.1 (linhas a azul mais claro).

Há diversos aspetos relacionados com a própria complexidade dos fenómenos hidráulicos que a abordagem analítica não permite ter em consideração, como sejam o escoamento altamente perturbado, as oscilações de massa e as instabilidades delas decorrentes que se observam no interior da bacia, bem como ainda a macroturbulência e o emulsionamento de ar. A não consideração destes aspetos no cálculo aqui apresentado pode também contribuir para as diferenças entre os resultados do modelo reduzido e da análise teórica.

Não obstante estas diferenças e incertezas, afigura-se lícito concluir com base na análise do funcionamento hidráulico que:

- o colchão de água no interior da bacia de dissipação é pouco eficaz, designadamente em situações de operação regular de gestão dos volumes de água entre as albufeiras do Funcho e do Arade, para as quais este apresenta espessura (D_{col}) insuficiente para amortecer a velocidade dos jatos à entrada no colchão (V_o), (Figura 3.3);
- as pressões dinâmicas médias máximas no fundo da bacia ocorrem na vizinhança da junta transversal central, sendo que se estima, com base analítica, que estas possam atingir valores da ordem de 36 m.c.a., e que os resultados experimentais indicaram que estas atingem, pelo menos, valores de cerca de 15 m.c.a. (LNEC, 1992);
- as flutuações de pressão podem levar a picos localizados que aumentam, ou reduzem, as pressões dinâmicas médias em cerca de 60%;
- as velocidades do escoamento junto ao fundo são da ordem de 20 a 25 m/s, ou seja, em presença de irregularidades das superfícies de betão pode ocorrer cavitação.



a) Vista lateral desde a margem direita



b) Vista para jusante desde o encontro direito da barragem

Figura 3.3 – Orifícios em funcionamento em março de 2013 para abertura de comportas de cerca de 25%, $Nm=92,64$ m e cota (44,24) na albufeira do Arade

3.3 Estabilidade das lajes do fundo da bacia de dissipação

Na conceção da bacia de dissipação de energia considera-se que as juntas de contração das lajes do fundo permitem isolar hidraulicamente as faces superior e inferior destas. O peso próprio das lajes (com 1,5 m de espessura), as juntas dentadas e as pregagens à fundação são ainda fatores que contribuem para a estabilidade das lajes face às solicitações flutuantes originadas pela elevada turbulência dos escoamentos que se produzem na bacia. No pressuposto de que todas estas disposições construtivas são eficazes, a operação dos descarregadores profundos não colocaria

problemas de estabilidade às lajes, dado que a ação hidrodinâmica as comprime, e de forma muito acentuada, contra a fundação.

Esta situação pode ser contudo comprometida se, de alguma forma, numa zona de elevadas pressões dinâmicas, como é a zona de deflexão dos jatos, for estabelecida continuidade hidráulica entre a face superior e a fundação. Tal pode ser consequência, por exemplo da fendilhação indesejada das lajes ou da rotura dos “*waterstop*” colocados nas juntas de contração.

A ocorrer uma tal situação, pode considerar-se que o sistema de drenagem da fundação funcionará como uma segunda linha de segurança, posto que, se este estiver operacional e possuir capacidade de vazão compatível com o escoamento que se estabelecerá na fundação, permitirá aliviar substancialmente as supressões transmitidas à fundação das lajes (esquema da Figura 3.4 a)).

Contudo, se o sistema de drenagem não for eficaz ou se estiver inoperacional, uma subpressão com a magnitude da pressão dinâmica imposta pelo jato na zona de continuidade hidráulica com a fundação (junta danificada) será transmitida integralmente à face inferior das lajes. Tal circunstância conduzirá ao estabelecimento de forças de subpressão que podem facilmente exceder o efeito conjunto do peso submerso das lajes, da resistência à tração das pregagens e do travamento proporcionado pelos dentes das juntas de contração.

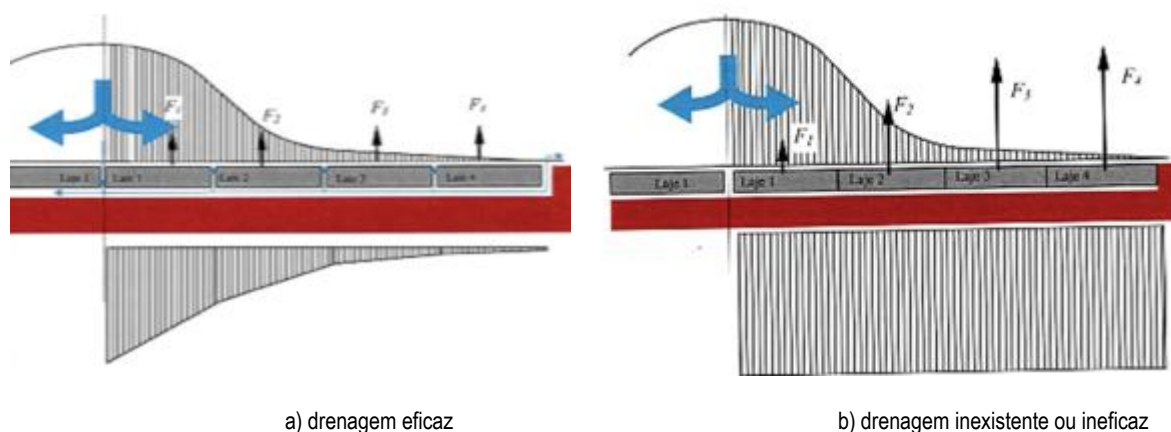


Figura 3.4 – Esquema de transmissão de pressão dinâmica à fundação por fissura ou junta de contração com estanquidade inoperacional

A título exemplificativo considere-se a laje de jusante do lado esquerdo do descarregador para a situação de ponto de estagnação “coincidente” com a junta de contração transversal, $Nm=96,00$ m e abertura de 75 %, com nível a jusante à cota (57,55) - situação representada na Figura 3.1 b).

Admitindo-se a rotura do “*waterstop*” numa extensão significativa (tornando o problema aproximadamente bidimensional), a inoperacionalidade da drenagem da fundação e que o decaimento das pressões dinâmicas a jusante da zona de deflexão do jato é muito acentuado, como se constatou ser o caso nos ensaios em modelo reduzido LNEC (1987 e 1992), procedeu-se a uma

estimativa aproximada das forças na laje. Admitiram-se os valores da subpressão estimados pelas vias analítica e experimental conforme se apresenta no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Estimativa das forças estabilizadoras e instabilizadoras numa laje de fundo em situação de rotura de “waterstop” e de drenagem inoperacional

Geometria da laje			
Espessura da laje (m)		1.50	
Largura da laje (m)		15.00	
Comprimento da laje (m)		15.00	
Área da laje em planta (m ²)		225.00	
Forças estabilizadoras (descontando efeito da junta dentada)			
Densidade submersa do betão (kN/m ³)		14	
Peso submerso da laje (kN)		4725.0	
número de varões de $\phi 25$ - S400		25	
Capacidade ressaltante à tração dos varões (kN)		4270.6	
Total estabilizador (kN)		8995.6	
Forças instabilizadoras - Subpressão média		Modelo analítico	Modelo reduzido
Subpressão (m.c.a)		35.6	15.0
Subpressão (kPa)		348.9	147.0
Força de subpressão(kN)		78498.0	33075.0
Forças actuantes /Forças resistentes		8.7	3.7

Não obstante as diferenças em relação às forças instabilizadoras de subpressão das duas abordagens consideradas ser muito grande (sendo que os possíveis motivos para as diferenças já foram mencionados), bem como o facto de se não ter considerado o efeito favorável de travamento conferido pelos dentes das juntas de contração, verifica-se que o rácio entre as forças instabilizadoras e as estabilizadoras é, em qualquer dos casos, muito superior à unidade, sendo esta situação indiciadora das consequências numa rotura das estanquidades das juntas (“waterstop”) para a segurança da bacia de dissipação de energia.

3.4 Turbulência residual a jusante da bacia de dissipação

O escoamento imediatamente a jusante da bacia de dissipação de energia apresenta uma energia turbulenta residual significativa, a qual, aquando dos ensaios em modelo reduzido, se verificou não ser compatível com a resistência do leito natural do rio a jusante (LNEC, 1987).

Tais circunstâncias levaram a que fosse então recomendada pelo LNEC a proteção do leito com um tapete de proteção de enrocamento constituído por blocos com diâmetro médio de 0,40 m, uma espessura dupla do diâmetro médio e uma extensão de 10 m para jusante, recomendações essas que foram consideradas no projeto. De acordo com os desenhos de projeto, a face superior da proteção de enrocamento seria executada à mesma cota da soleira do degrau de saída da bacia de dissipação, ou seja, à cota (54,00).

Interessa referir que os estudos em modelo reduzido deixaram em aberto a extensão na direção transversal a considerar-se para proteção de enrocamento, por esta “depende da profundidade do maciço rochoso” que se viesse a determinar em obra.

Tendo presente as incertezas quanto à eficácia da proteção a jusante, foi ainda recomendado pelo LNEC que, após cada período de cheias, se procedesse à observação da zona a jusante da bacia, incluindo um levantamento topográfico da zona protegida com enrocamento.

Quanto à operação das comportas, em resultado dos estudos em modelo reduzido o LNEC também recomendou que o funcionamento dos orifícios, na medida do permitido pelas características das comportas, fosse feito com aberturas de comportas simétricas, por forma a assegurar um escoamento em condições adequada no interior da bacia e imediatamente a jusante desta, e minimizar o risco de arrastamento de material sólido de jusante para o interior da bacia de dissipação.

4 | Avaliação da degradação do betão armado da bacia de dissipação

4.1 Nota prévia sobre a degradação da bacia

No referente ao estado de degradação do betão armado da bacia de dissipação destaca-se o que consta da Ata Nº1 das visitas de inspeção, datada de 21 de janeiro de 2003: *“Recomenda-se a reparação das erosões que existem na bacia de dissipação já detestadas e levantadas, considerando-se necessária a realização de nova inspeção à bacia, após esvaziamento desta. De facto, a simples observação mostrou erosão das superfícies que eram visíveis, havendo armaduras expostas e outras já arrancadas. Da mesma forma, é necessária a reparação do canal de restituição imediatamente a jusante da bacia de dissipação.”*, Ata Nº1 (2003).

Note-se que na Ata o termo erosão é entendido como deterioração quer seja por erosão do betão quer por cavitação.

Registos análogos foram sendo vertidos em todas as atas das inspeções anuais consultadas, que cobrem o período de 2003 a 2013, (Ata Nº1, 2003 à Ata Nº11, 2013).

Por exemplo, na Ata Nº11 de 13 de março de 2013 consta o seguinte: *“O representante da Autoridade informou o Dono de Obra que o processo de adjudicação da elaboração do projeto de reparação da bacia de dissipação deve ser concluído com urgência, para que sejam repostas as condições de segurança e funcionalidade da bacia. Caso o projeto não seja adjudicado até ao Verão, deverá ser efetuada uma inspeção à bacia para averiguar do seu estado atual”*.

Entretanto, não se tendo concretizado a adjudicação do projeto de reparação, foi conduzida uma inspeção à bacia de dissipação, a seco, no dia 13 de setembro de 2013 com participação de técnicos da APA e do LNEC. A inspeção visual efetuada não evidenciou ter havido uma evolução significativa da deterioração da bacia face à situação que fora detetada em finais da década de 90. Na Fig. A.15 (2013) à Fig. A.28 incluem-se registos fotográficos dessa visita de inspeção. Destaca-se a presença de blocos rochosos do enrocamento no interior, sendo que um bloco devia ter sido arrastado há pouco tempo, por ainda ter “arestas vivas”, e os restantes blocos aparentavam ter estado sujeitos há já algum tempo à abrasão, por terem superfícies “roladas” (Fig. A.27). A situação de blocos no interior da bacia observada em 2013 consistiu num problema de escala muito diminuta face àquele ocorrido durante os anos 90 (1996) e que terá estado na origem da grande deterioração das superfícies de betão da bacia (Fig. A.15).

Na visita de inspeção de setembro de 2013 observaram-se também sinais de desmoronamento de alguns blocos da proteção dos taludes das margens para o leito, em particular na margem direita. Posteriormente, aquando da visita de inspeção de outubro de 2015, notou-se que esta situação se agravara (Fig. A.11), sendo que alguns dos blocos que se desmoronaram dos taludes das margens ficaram depositados junto, ou mesmo sobre, o degrau de saída da bacia. Face ao padrão do

escoamento na zona terminal da bacia e imediatamente a jusante desta, conforme descrito em Ramos (1999), esta situação torna muito provável que, aquando da operação dos orifícios descarregadores, os blocos nesta localização sejam arrastados para o interior da bacia. Aliás, nada permite apurar se entre 2013, data da última inspeção da bacia a seco, e 2015, bacia cheia, alguns blocos rochosos do enrocamento não terão sido arrastados para o interior da bacia, dado que a experiência passada mostrou haver tendência para isso acontecer.

Assim, apesar das medidas de proteção levadas a cabo em finais dos anos 90 com a reconstrução das proteções de enrocamento do leito e das margens a jusante, bem como os cuidados que se tem tido na operação das comportas, assegurando sempre que possível aberturas iguais destas, se terem mostrado mais eficazes do que a solução de operação nos primeiros anos de exploração da obra, constata-se que ainda há tendência para o escoamento instabilizar o enrocamento a jusante, em particular o da proteção das encostas das margens, com a consequente entrada de blocos para o interior da bacia.

4.2 Classe de exposição ambiental

O betão armado da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho está permanentemente saturado (betão imerso) e/ou inserido num ambiente húmido (betão acima da cota de soleira do degrau de saída), pelo que, segundo a secção 4.1 da norma portuguesa NP EN 206-1, devem ser consideradas as classes de exposição ambiental XC1 e XC2 (corrosão induzida por carbonatação), respetivamente, para a zona imersa e a zona acima da cota da soleira do degrau de saída.

Relativamente à agressividade química da água da bacia é necessário conhecer a sua constituição química. Para tal, em documentos a que se teve acesso respeitantes à época do início do funcionamento da barragem e da observação hidroquímica até ao corrente ano (LNEC, 1993 e LNEC, 1996), foi obtida informação relativa à análise química da água da albufeira, apresentada no Quadro 4.1.

Da análise do Quadro 4.1, observa-se que a temperatura da água da albufeira é relativamente baixa no inverno (11,5°C a 14,5°) e amena no verão (20,5 a 26,4°C); o pH é atualmente ligeiramente alcalino (8,08 a 8,72), mas em períodos anteriores observam-se medições correspondentes a água ligeiramente ácida (pH próximo de 6); a diferença dos valores do pH da água obtidos nas determinações efetuadas com e sem adição de carbonato de cálcio tem vindo a aumentar ligeiramente, mas mantendo-se inferior à unidade, o que significa que existirá dióxido de carbono agressivo e a água não é incrustante.

Uma água não incrustante (também designada água branda) consiste numa água que tem a capacidade de lixiviar o hidróxido de cálcio dos poros do betão pela sua renovação, promovendo a dissolução progressiva dos componentes do cimento. Assim, recomenda-se que sejam colhidas duas amostras representativas da água da bacia de dissipação de energia, sobre as quais devem ser efetuadas as análises em laboratório para determinação da classe de agressividade química, de acordo com o Quadro 2 da NP EN 206-1, conforme indicado adiante, na secção 5.3.1.

Considera que as características químicas da água da bacia não serão muito diferentes das características químicas da água da albufeira, embora na albufeira a análise química deva ser efetuada em profundidade.

Ainda como condições de serviço do betão da bacia, deve ser considerada a exposição contínua à ação de um escoamento hidráulico com características particulares, nomeadamente com elevados valores de velocidade na zona de impacto dos jatos provenientes das descargas e com elevada turbulência (Ramos, 1999). A situação de escoamento com transporte de sólidos deve também ser considerada tendo em conta a recorrência ao longo do tempo de serviço da bacia (Figuras A1.15, A.17, A.23 e A.27).

Quadro 4.1 – Compilação da informação relativa à análise química da água da albufeira (LNEC, 1993 e 1996 e resultados de observações hidroquímicas)

Parâmetro	Expressão do resultado	Método de ensaio	Resultado				
			Rel. 14/93 ^{a)}	Rel. 219/96 ^{b)}	Rel. 219/96 ^{c)}	Ob. Hidrau. ^{d)}	Ob. Hidrau. ^{e)}
Resíduo em suspensão	g/dm ³	LNEC E 380	0,1	-	-	-	-
Resíduo dissolvido			0,3	-	-	-	-
Matéria orgânica	mg O ₂ /dm ³	NP 1414	5,1	-	-	-	-
Teor de sulfatos, SO ₄ ²⁻	mg/dm ³	NP 413	44,3	101,2	-	-	-
Teor de sulfuretos, S ²⁻	mg/dm ³	NP 1417	0,0	0,0	-	-	-
Teor de magnésio, Mg ²⁺	mg/dm ³	NP 507	25,3	27,5	-	-	-
Teor de cloretos, Cl ⁻	mg/dm ³	NP 423	48,9	50,3	-	-	-
Teor de sódio, Na ⁺	mg/dm ³	E 381	32	105	-	-	-
Teor de potássio, K ⁺	mg/dm ³		1,8	3,2	-	-	-
Dióxido de carbono agressivo	mg CaCO ₃ /dm ³	NP 1416	9,3	-	-	-	-
pH	-	NP 411	7,64	-	-	-	-
		Eq. pH 320 SET	-	7,63	7,01; 6,02; 8,37	6,99; 6,38; 7,80	8,48; 8,08; 8,72
Índice de agressividade para o carbonato de cálcio	mg CaCO ₃ /dm ³	NP 1416 Eq. pH 320 SET	+0,3 -	-0,12 a -0,19 -	-0,21; -1,52; +0,36	-0,41; -0,92; +0,11	-0,53; -0,82; -0,37
Temperatura da água	°C	Eq. pH 320 SET	-	-	17,0; 11,5; 26,4	15,7; 11,2; 23,8	18,3; 14,5; 20,5

^{a)} Valor médio de 2 a 3 amostras colhidas em datas diferentes

^{b)} Variação em amostras colhidas em 3 locais a montante da obra, previamente à instalação da albufeira (fecho do rio)

^{c)} Valor médio, mínimo e máximo de 12 observações da água às diversas profundidades, entre 1992 e 1996

^{d)} Valor médio, mínimo e máximo de 12 observações da água às diversas profundidades, entre 2004 a 2013

^{e)} Valor médio, mínimo e máximo de 12 observações da água às diversas profundidades, em 2015-10-27

4.3 Descrição das anomalias visíveis

A avaliação do estado de degradação do betão armado da bacia de dissipação de energia foi efetuada com base na inspeção visual realizada em outubro de 2015 e em fotografias colhidas durante as inspeções anteriormente realizadas, em 1996, 2004 e 2013. Sempre que possível, fez-se o confronto das fotografias retiradas nos mesmos locais da bacia, em diferentes inspeções (épocas).

Em algumas fissuras no corpo a jusante da barragem e na bacia de dissipação (Figura A.12) foi observada a presença de escorrências e incrustações de cor esbranquiçada. A sua formação terá resultado da percolação de água através das fissuras existentes no betão, que dissolveu os cristais de hidróxido de cálcio da pasta de cimento e, em contato com o dióxido de carbono da atmosfera deu origem a escorrências e/ou ao depósito de cristais de carbonato de cálcio. No coroamento da barragem e na plataforma do posto de comando local das comportas de serviço (Figuras A.13) foram observadas armaduras expostas corroídas em zonas de menor espessura de recobrimento. A corrosão terá sido induzida pela carbonatação do betão de recobrimento. Contudo, como referido no capítulo 1, estas observações não serão objeto deste relatório.

Na parede direita da bacia, imediatamente acima da linha de água e junto ao corpo da barragem, observa-se uma pequena área com delaminação do betão de recobrimento e exposição de armaduras corroídas (Figura A.14).

A linha de água nas paredes da bacia (Figuras A.14) é facilmente identificada pela diferença de coloração do betão e localiza-se ligeiramente acima da soleira do degrau de saída (cota 54 m, a 2,5 m da laje de fundo), separando a zona permanentemente imersa da zona normalmente emersa exceto durante os períodos de descarga.

Na generalidade, o betão das paredes da bacia abaixo do muro defletor e acima da linha de água (Figura A.16) apresenta um aspeto rugoso com exposição dos agregados, devido à perda da pasta de cimento. A perda de pasta de cimento terá resultado do ataque químico da água, que por lixiviação do hidróxido de cálcio dos poros do betão pela sua renovação, foi promovendo a dissolução progressiva dos componentes do cimento. Efetivamente, apesar da agressividade da água não ser elevada, a estrutura porosa do betão terá dimensão suficientemente aberta para ocorrer descalcificação significativa, face aos valores da resistência indicados no Quadro 2.2.

O betão das paredes abaixo da linha de água, da laje de fundo da bacia e da soleira do degrau de saída apresenta um aspeto polido com irregularidades na superfície, desde pequenos orifícios (resultado do arrancamento do agregado grosso) a extensas concavidades com perda de secção (nas arestas e nas juntas de contração), e com exposição de armaduras corroídas por destacamento (desgaste) do betão de recobrimento (Figuras A.17 e A.18). Este aspeto do betão terá resultado da erosão por abrasão, devido ao desgaste provocado pela fricção e polimento dos blocos rochosos do enrocamento transportados pela água em movimento e que foram arrastados para o interior da bacia devido ao seu funcionamento hidráulico (Ramos, 1999). A resistência do betão não é particularmente elevada, pelo que a circulação de elementos sólidos de dimensão significativa tem capacidade de destruir o betão.

Na laje de fundo da bacia, as juntas de contração encontram-se abertas com as arestas desgastadas, expondo as armaduras corroídas e o vedante com uma deterioração avançada (Figuras A.19 e A.20).

A interseção das paredes com a laje de fundo e a soleira do degrau de saída são as zonas visíveis com maior intensidade de degradação, particularmente no lado sudeste (lado esquerdo) (Figuras A.21 e A.22), provavelmente por constituírem obstáculo à movimentação de sólidos no interior da

bacia, devido às condições de escoamento no seu interior e imediatamente a jusante desta aquando da operação dos orifícios descarregadores hidráulicos da bacia, conforme descrito por Ramos (1999), (Figura A.23).

A comparação das Figuras A.17 (1996) e A.22 (2013) sugere que o coroamento do muro de saída terá sido reparado entre 1996 e 2013.

No betão das paredes junto do muro defletor (Figura A.25) é visível uma coloração diferente, que se julga resultar também da proteção solar conferida pelo muro defletor. Na generalidade, o betão dessa zona não evidencia sinais de degradação por ataque químico.

4.4 Níveis de degradação do betão

Com base nas observações efetuadas nas inspeções realizadas à bacia de dissipação de energia consideram-se dois níveis de degradação do betão da bacia:

- Nível 1: Áreas com degradação média, onde a profundidade de degradação é menor ou igual a cerca de 3 cm e, na generalidade, abrange o betão das paredes abaixo do muro defletor e acima da linha de água. A degradação terá resultado essencialmente do ataque químico da água da bacia (Figura A.16).
- Nível 2: Áreas com grande degradação, onde a profundidade de degradação é superior a cerca de 3 cm e abrange, na generalidade, o betão das paredes abaixo da linha de água, o betão das lajes de fundo da bacia e o betão do degrau de saída. A degradação terá resultado da erosão por abrasão do betão devido ao desgaste provocado essencialmente pela fricção e polimento dos blocos rochosos do enrocamento transportados pela água em movimento e que são arrastados para o interior da bacia devido ao seu funcionamento hidráulico (Figuras A.17 a A.23).

4.5 Causas da degradação do betão

A degradação do betão da bacia de dissipação considera-se ter resultado dos seguintes fatores associados às anomalias observadas:

- classe de resistência à compressão do betão inferior ao valor atualmente especificados para a agressividade química do meio devido ao ataque químico da água da bacia (que se estima ser da classe de exposição XA1), para uma vida útil de 50 anos, segundo a especificação LNEC E 464;
- deficiente pormenorização e/ou configuração da proteção de enrocamento do leito e das margens do canal de restituição a jusante da bacia, tendo o escoamento macroturbulento, caracterizado por recirculações e oscilações em massa especialmente intensas, arrastado uma grande quantidade de blocos do enrocamento para o interior da bacia de dissipação (Ramos, 1999).

4.6 Ensaios realizados no local

4.6.1 Profundidade de carbonatação do betão

Na inspeção visual à bacia de dissipação de energia, realizada em 2015-10-28, pelo NBPC, a profundidade de carbonatação do betão foi medida pontualmente na face externa da parede direita da bacia, na aresta do muro defletor com a parede (Figura A.29). Com o auxílio de um martelo removeu-se o betão de recobrimento, e a superfície de rotura exposta foi aspergida com a solução de fenolftaleína para determinar a profundidade de carbonatação do betão, de acordo com os procedimentos indicados na especificação LNEC E 391. A solução mantém a cor transparente nas zonas onde o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) foi convertido em carbonato de cálcio (CaCO_3), com pH inferior a cerca de 9 (zonas carbonatadas). Onde o dióxido de carbono (CO_2) ainda não penetrou ou não reagiu/consumiu o hidróxido de cálcio, com pH superior a 9, a solução muda para cor-de-rosa. A profundidade de carbonatação medida foi muito reduzida, entre 1 a 2 mm.

Tendo em conta que o fenómeno da carbonatação do betão é um processo lento e que o betão emerso da bacia se insere no ambiente XC2, a reduzida profundidade de carbonatação medida pontualmente em 2015-10-28 sugere que será de esperar uma frente de carbonatação baixa na generalidade do betão da bacia, apesar do betão apresentar cerca de 22 anos de idade.

Contudo, recomenda-se que antes do início dos trabalhos de reparação, a profundidade de carbonatação do betão da bacia seja avaliada nomeadamente ao nível das armaduras para permitir especificar corretamente a profundidade de remoção do betão em cada nível de degradação definido (ver secção 5.3.2).

4.6.2 Resistência superficial do betão

Ainda, durante a inspeção visual à bacia realizada em 2015-10-28, e com o objetivo de analisar a resistência do betão “*in-situ*”, foram efetuadas 9 leituras com o esclerómetro na face externa das paredes direita e esquerda, numa zona restrita de cerca de $(30 \times 30) \text{ cm}^2$. O índice esclerométrico foi obtido da mediana dos resultados, de acordo com a metodologia indicada na norma NP EN 12504-2. Para os valores de 40 e 46 do índice esclerométrico, respetivamente, na parede direita e esquerda, obtêm-se os valores de resistência superficial do betão “*in-situ*” de 35 MPa e 44 MPa, com base na curva de conversão do equipamento. Comparando os valores da resistência superficial obtidos pelo esclerómetro com os valores da resistência à compressão do betão apresentados no Quadro 2.2, considera-se que estão valores estarão coerentes com a resistência à compressão “*in-situ*” tendo em conta o coeficiente de endurecimento do betão. No entanto este ensaio esclerométrico quando usado isoladamente, apenas tem como objetivo uma avaliação qualitativa.

Durante os trabalhos de remoção do betão degradado deverão ser extraídas carotes de betão em zona sã para determinação da resistência à compressão do betão “*in-situ*” e para melhor prescrever as propriedades do betão de reparação a usar nos trabalhos de reabilitação da bacia (ver secção 5.3.3 e 5.3.4).

4.7 Conclusões relativas à degradação do betão armado

Da avaliação da degradação do betão armado da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho, salientam-se os seguintes aspetos:

- a) O betão da zona imersa e da zona acima da cota da soleira do degrau de saída insere-se, respetivamente, nas classes de exposição ambiental XC1 e XC2 (corrosão induzida por carbonatação). Relativamente ao ataque químico, os elementos disponíveis sugerem que nas zonas em contato com a água a classe de exposição é a XA1.
- b) Dos documentos consultados foi obtida a informação da existência de dióxido de carbono agressivo na água da albufeira indiciando tratar-se de uma água não incrustante; e, dos valores médios da resistência à compressão aos 28 e 90 dias, respetivamente, de 22,1 MPa e 31,1 MPa, para a 8ª composição de betão, a que terá sido aplicada na construção das peças armadas da bacia.
- c) As principais anomalias identificadas no betão da bacia com base na inspeção visual realizada em outubro de 2015 foram: o aspeto rugoso com exposição do agregado, devido à perda da pasta de cimento, do betão das paredes abaixo do muro defletor e acima da linha de água; o aspeto polido com irregularidades na superfície, desde pequenos orifícios a extensas concavidades com perda de secção e com exposição das armaduras corroídas, por destacamento do betão de recobrimento, do betão abaixo da linha de água e na totalidade da face superior da laje de fundo e do muro de saída; e, a destruição das juntas de contração com exposição do vedante deteriorado, da laje de fundo da bacia.
- d) Foram definidos dois níveis de degradação do betão da bacia: nível 1 com profundidade de degradação inferior ou igual a cerca de 3 cm, resultante do ataque químico da água da bacia; e, nível 2 com profundidade de degradação superior a cerca de 3 cm, resultante da erosão do betão devido ao desgaste provocado pela fricção e polimento dos blocos rochosos do enrocamento transportados pela água em movimento e que são arrastados para o interior da bacia devido ao seu funcionamento hidráulico.
- e) As causas da degradação observada no betão armado da bacia são atribuídas à baixa resistência à compressão do betão em relação ao valor atualmente especificado para a agressividade química do meio, devido ao ataque químico da água da bacia, e à deficiente pormenorização e/ou configuração da proteção de enrocamento das margens e do leito do canal de restituição a jusante da bacia, incapaz de resistir à ação hidráulica do escoamento, o que tem conduzido ao longo do tempo ao arrastamento de blocos rochosos do enrocamento para o interior da bacia, impondo uma ação ao material que não foi considerada na sua especificação.
- f) Tendo em conta que o fenómeno da carbonatação do betão é um processo lento e que o betão emerso da bacia se insere no ambiente XC2, a reduzida profundidade de carbonatação medida pontualmente em 2015-10-28 sugere que será de esperar uma frente de carbonatação baixa na generalidade do betão da bacia, apesar do betão apresentar cerca de 22 anos de idade.

- g) Os valores da resistência superficial do betão “*in-situ*” inferidos pelo esclerómetro em 2015-10-28 consideram-se coerentes com a resistência à compressão característica especificada para o betão da bacia, com base na informação recolhida nos documentos consultados.
- h) Para a definição da espessura de betão a remover e a correta prescrição das propriedades do betão a aplicar na reparação da bacia recomenda-se que, antes do início dos trabalhos de reparação, sejam realizadas as determinações de: classe de agressividade química da água da bacia; profundidade de carbonatação do betão “*in-situ*”; resistência à compressão e à tração direta do betão “*in-situ*”.

5 | Recomendações complementares para o projeto e empreitada de reabilitação

5.1 Alguns aspetos essenciais para a eficácia da reparação

A metodologia de intervenção na bacia de dissipação de energia pressupõe que, a par da sua implementação, será eliminada a causa principal da atual erosão do betão da bacia, o que passa pela execução de uma solução estável de proteção do leito e das margens do canal de restituição a jusante da bacia. Considera-se que a definição da solução deverá ser objeto de um projeto de especialidade. Esta nova solução deve ser capaz de eliminar definitivamente a possibilidade do arrastamento/movimento de material sólido com dimensões significativas para o interior da bacia de dissipação.

No âmbito da proteção a jusante da bacia, é recomendável que a cota do leito do rio imediatamente a jusante do degrau de saída da bacia se situe abaixo da cota da soleira deste. Com esta disposição construtiva torna-se mais difícil o transporte de material solto do leito e encostas margens a jusante para o interior da bacia de dissipação. Recomenda-se pois que o plano médio da superfície do leito se situe uma distância abaixo do degrau de saída de pelo menos 0,50 m ou, caso se opte por uma proteção de enrocamento, igual ao diâmetro mediano dos blocos de proteção.

A reabilitação conjunta da bacia e da proteção das margens do canal de restituição deve ser efetuada em período de estiagem para minimizar o risco de ocorrência de descargas de cheias durante os trabalhos de reparação.

Tendo em conta que a descarga de fundo da barragem será interrompida durante a execução da reparação da bacia de dissipação, deverá ser previsto um programa para a gestão dos volumes afluentes à albufeira e das necessidades de água a jusante, o qual deverá ser articulado com o programa de trabalhos de reparação no sentido de minimizar as interferências.

5.2 Aspetos de carácter geral a ter em consideração na reparação

A reparação da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho deve repor a integridade estrutural dos elementos de betão armado, corrigindo as anomalias existentes e conferindo a resistência mecânica mínima contra a lixiviação (agressividade química da água da bacia) e a ação hidráulica do escoamento sem transporte de sólidos, para uma vida útil de 50 anos, de acordo com o estabelecido na especificação LNEC E 464, (Ribeiro 2004).

A intervenção que se propõe para corrigir as anomalias observadas na bacia, deve ser iniciada pela apresentação e aprovação de todos os documentos que demonstrem o cumprimento das exigências aplicáveis, referentes ao Sistema de Estanquidade para as juntas de contração da laje de fundo da bacia e para o betão de reparação e seus constituintes, das ações a implementar no caso de não conformidades no controlo de qualidade da aplicação do Sistema de Estanquidade e do betão de

reparação, e das tarefas que devem constituir o controlo da qualidade durante a aplicação dos mesmos.

De um modo geral, os trabalhos de reparação deverão consistir, primeiramente, na remoção do betão degradado em profundidade, de acordo com o nível de degradação definido, e na remoção do Sistema de Estanquidade das juntas (*“waterstop”*), deteriorado ou com defeitos. Segue-se a preparação das superfícies das armaduras e sua complementação/substituição, de acordo com o projeto original, quando necessário, bem como a preparação da superfície do betão exposto que irá funcionar como superfície de colagem do betão de reparação. Seguir-se-ão os trabalhos de reparação, que devem consistir na reconstituição das juntas de contração da laje de fundo, incluindo a aplicação do novo Sistema de Estanquidade, e na colocação de um betão de reparação de qualidade e recobrimento em conformidade com as exigências regulamentares em vigor para o ambiente em que se insere a bacia.

O controlo da qualidade durante a aplicação do Sistema de Estanquidade das juntas de contração da laje de fundo da bacia e do betão de reparação deve consistir no acompanhamento e registo das etapas realizadas e na análise dos resultados dos ensaios de amostragem prescritos para o controlo das suas propriedades e da qualidade da sua aplicação, de modo a detetar não conformidades e avaliar a sua causa, permitindo a implementação de ações corretivas previamente acordadas.

5.3 Ensaios a realizar no local antes da reabilitação

5.3.1 Agressividade química da água da bacia

A classe de agressividade química da água da bacia de dissipação de energia deve ser determinada com base nos resultados das concentrações hidrogeniónica (pH), do dióxido de carbono agressivo (mg/l), dos iões sulfatos, magnésio e do azoto amoniacal presentes na água da bacia, de acordo com o Quadro 2 da NP EN 206-1.

A mínima amostragem para a classificação da classe de agressividade química da água da bacia deve ser de, pelo menos, duas amostras representativas da água da bacia, de acordo com a norma NP 1415 ou NP EN 1008.

A classificação da agressividade da água deve ser efetuada de acordo com o especificado no Quadro 2 da NP EN 206-1.

5.3.2 Profundidade de carbonatação do betão

A profundidade de carbonatação do betão deve ser determinada de acordo com a metodologia descrita na EN 14360 e na especificação LNEC E 391.

A mínima amostragem para a medição da frente de carbonatação deve ser de 3 amostras, respetivamente, para o betão com degradação do nível 1 e 2 (ver secção 4.4). A amostra de betão deverá ser partida ao meio e a profundidade de carbonatação imediatamente medida nas superfícies de fratura, conforme a metodologia descrita na EN 14360 e na especificação LNEC E 391.

O resultado das medições (espessura de betão carbonatado) deverá ser comparado com a espessura de betão degradado a remover em cada nível de degradação definido, devendo ser adotado o maior valor para a espessura do betão a remover, de acordo com a secção 7.2.4 da NP EN 1504-10.

5.3.3 Resistência mecânica do betão

As resistências à compressão e à tração direta do betão da bacia de dissipação de energia devem ser determinadas através da extração de carotes de betão, com pelo menos 120 mm de diâmetro, respetivamente, de acordo com a metodologia descrita na NP EN 12390-3 e segundo o Método Interno do LNEC. Este Método Interno do LNEC consiste em determinar a resistência à tração através da aplicação de uma força de tração nos discos metálicos colados às faces dos provetes de ensaio.

A mínima amostragem para a determinação da resistência mecânica do betão existente deve ser, de pelo menos, 3 amostras em zona de betão são, para cada nível de degradação definido (ver secção 4.4).

Os valores médios da resistência à compressão e à tração obtidos permitirão, respetivamente, aferir a qualidade do betão existente e o menor valor a exigir para a aderência do betão de reparação ao betão existente.

5.3.4 Resistência ao desgaste por abrasão do betão

A resistência ao desgaste por abrasão do betão da bacia de dissipação de energia deve ser determinada, segundo o Anexo G da norma NP EN 1338, com o objetivo de permitir definir o menor valor a exigir para a resistência superficial ao desgaste por abrasão do betão de reparação.

Os provetes de betão para o ensaio poderão ter secção retangular, com (120 x 70) mm², ou a secção circular, com 120 mm de diâmetro, e uma espessura de 30 mm.

A mínima amostragem para a determinação da resistência ao desgaste por abrasão do betão existente deve ser, de pelo menos, 3 amostras em zona de betão são, para cada nível de degradação definido (ver secção 4.4).

5.4 Recomendações relacionadas com a reparação do betão armado

5.4.1 Remoção de betão

Para o betão com degradação média, nível 1, conforme definido na secção 4.4, a espessura do betão a remover deve ser superior à máxima dimensão do agregado do betão existente e/ou ao resultado das medições da profundidade de carbonatação, conforme definido na secção 5.3.2.

Para o betão com grande degradação, nível 2, conforme definido na secção 4.4, a espessura do betão a remover deve ir para além da primeira camada de armaduras, de modo a permitir efetuar a limpeza das armaduras em todo o seu perímetro e garantir que estas venham a ficar envolvidas pelo

betão de reparação, sem que ocorra segregação nem formação de vazios. Para tal, a distância mínima entre cada armadura e entre estas e o betão remanescente deverá ser pelo menos 15 mm ou a máxima dimensão do agregado do betão de reparação, conforme esquematizado na Figura A.31.

Na zona das juntas de contração da laje de fundo, a profundidade de remoção do betão deverá ainda ser ajustada de modo a permitir a correta reconstrução da junta (junta dentada, Figura A.2).

Saliente-se que, durante os trabalhos de remoção do betão haverá que ter atenção às zonas das pregagens à fundação (Figura A.4).

O perímetro da área a remover deve ser delineado segundo linhas retas que não formem ângulos agudos, evitando a multiplicidade de cortes (BUREC, 1996). A geometria da área de betão removido deve apresentar ângulos retos como ilustra a Figura A.31, de modo a permitir confinar o material de reparação. Os bordos do betão após a remoção devem ser tornados rugosos e serem cortados com uma inclinação para o exterior, para facilitar a saída de ar durante a colocação/compactação/vibração do betão de reparação.

De acordo com a secção A.7.2.4 (Anexo A) da NP EN 1504-10, deve ser prevista e exigida a remoção da camada superficial do betão com recurso a uma metodologia de baixa energia complementar à metodologia efetuada por impacto (maquinaria pesada pneumática e/ou martelos pneumáticos) pelo frequente desenvolvimento de microfissuras no betão são.

Os métodos de remoção escolhidos para os dois níveis de degradação definidos (secção 4.4) devem ser objeto de acordo e aprovação, antes do início dos trabalhos de reparação.

5.4.2 Preparação das superfícies das armaduras e do betão expostas

Após a conclusão da remoção do betão, haverá que tratar as superfícies expostas das armaduras e do betão, pois irão funcionar como superfícies de colagem do betão de reparação.

A superfície do betão exposto deve apresentar-se,

1. Limpa e isenta de poeiras e material desagregado.
2. Rugosa com agregados à vista de modo a aumentar a ligação mecânica.
3. Húmida de modo a não absorver água do betão de reparação, mas sem acumulação de água na superfície; na zona das juntas de contração da laje de fundo, o estado de humidade do betão deverá ser compatível com o exigido na Ficha Técnica do Sistema de Estanquidade (“*waterstop*”) a aplicar.

Todas as armaduras corroídas expostas ou que venham a ficar expostas pela remoção do betão envolvente, devem ser preparadas de acordo com a secção 7.3 da NP EN 1504-10. A superfície das armaduras deve apresentar-se limpa da camada de óxidos resultantes da corrosão. Saliente-se a necessidade desta limpeza ser efetuada em toda a periferia da armadura (Figura A.30).

O Sistema de Estanquidade (“*waterstop*”) exposto ou que venha a ficar exposto pela remoção do betão envolvente, deve ser inspecionado e caso apresente sinais de deterioração, defeitos ou danos visíveis deve ser removido na totalidade e em toda a sua extensão.

5.4.3 Reforço/Substituição das armaduras e do Sistema de Estanquidade das juntas de contração

Caso se observe uma redução do diâmetro de uma armadura após a sua limpeza, traduzida numa redução da área da secção transversal superior 10%, deve ser efetuada a complementação/substituição da armadura, de acordo com as práticas correntes (Diretoria de Engenharia, 2006 e DNIT 084 ES, 2006). A reparação deve ser efetuada em conformidade com a secção 6 da NP EN 13670 e com as normas em vigor indicadas na secção 3.2 da NP EN 1992-1-1, podendo ser adotados os métodos de adição suplementar de nova armadura ou por substituição da armadura corroída, como se ilustra na Figura A.32.

Com base na avaliação da redução de secção das armaduras corroídas expostas, devem ser repostas as armaduras de projeto consideradas necessárias, em conformidade com a secção 6 da NP EN 13670 e com as normas em vigor indicadas na secção 3.2 da NP EN 1992-1-1.

Caso se opte por utilizar metodologias de soldadura indicadas na EN 17660 para as armaduras existentes na bacia de dissipação, recomenda-se efetuar previamente uma análise química a uma amostra do aço aplicado de modo a quantificar o seu teor de carbono para averiguar esta possibilidade.

O Sistema de Estanquidade deve ser objeto de acordo e aprovação, antes do início dos trabalhos de reparação. O Sistema de Estanquidade para as juntas de contração da laje de fundo (secção 5.4.6) deve ser aplicado por técnicos especializados, cumprindo as recomendações indicadas na Ficha Técnica do produto.

5.4.4 Colocação e cura do betão de reparação

Os métodos de colocação do betão de reparação recomendados, por se considerarem os mais apropriados para a reparação generalizada da bacia, serão a projeção ou a moldagem, respetivamente, efetuados em conformidade com as secções 8.2.3 e 8.2.4. da NP EN 1504-10 e secções 8.4.1 e 8.4.4. da NP EN 13670.

A superfície final do betão de reparação (“betão à vista”) em contato com o escoamento deverá ter um acabamento adequado, de modo a evitar condições favoráveis à ocorrência de fenómenos de cavitação. Devem ser evitadas irregularidades na superfície, nomeadamente cavidade/saliência, vazios superficiais/ninhos de pedra, entre outras.

Os requisitos para o betão de reparação devem satisfazer o indicado na secção 5.4.6 deste relatório.

A amostragem do betão projetado ou moldado deve ser efetuada de acordo com a NP EN 14488-1 e NP EN 12350-1, respetivamente.

De acordo os Quadros 4 da secção 8.5 e F.2 do Anexo F da NP EN 13670, o betão de reparação deve ser curado até que a resistência atinja no mínimo 50 % da classe de resistência especificada (Classe de cura 3).

As cofragens devem ser projetadas e construídas de modo a satisfazerem os requisitos indicados na secção 5 da NP EN 13670.

5.4.5 Especificação do betão de reparação

Os materiais a utilizar no fabrico do betão de reparação (cimento, agregados, água de amassadura, adjuvantes, adições) devem estar conformes com as normas em vigor, indicadas na NP EN 206-1, secções 5.1 e 5.2. Deverá ser dada atenção particular à prevenção das reações álcalis-silica, seguindo as disposições que constam da Especificação LNEC E 461.

A máxima dimensão do agregado, definida de acordo com a NP EN 12620, deve ser a maior possível para a espessura do recobrimento, o espaço livre entre os varões da armadura e o valor estabelecido na especificação de execução conforme definido na secção 8.1-3 da NP EN 13670.

A consistência da composição húmida do betão projetado deve ser definida de acordo com a secção 4.2.1 da EN 206 e, para o betão moldado, autocompactável, segundo a secção 4.2.1 da NP EN 206-9.

A amostragem do betão deve ser efetuada de acordo com a NP EN 12350-1. Para o betão moldado, os provetes de ensaio devem ser fabricados e curados segundo a NP EN 12390-2 e, no caso do betão projetado segundo a NP EN 14488-1 e/ou a NP EN 12504-1. A resistência à compressão do betão deve ser classificada em conformidade com as EN 206 e NP EN 14487-1 e determinada segundo a NP EN 12390-3 e NP EN 12504-1.

A composição e a classe de resistência do betão de reparação devem satisfazer o estabelecido no Quadro 6 da especificação LNEC E 464 para uma vida útil de 50 anos, face à ação ambiental XC1 e XC2 (betão seco ou permanentemente húmido e húmido e/ou raramente seco).

No caso dos resultados da análise química da água da bacia classificar a sua agressividade química na classe XA1, conforme definido no Quadro 2 da EN 206-1, a composição e a classe de resistência do betão de reparação deverão então satisfazer os requisitos mínimos estabelecidos no Quadro 9 da especificação LNEC E 464, podendo optar-se por:

- C35/45, com uma dosagem mínima de cimento de 340 kg/m^3 e uma relação A/C máxima de 0,50 para CEM I ou CEM II/A, ou
- C30/37, com uma dosagem mínima de cimento de 320 kg/m^3 e uma relação A/C de 0,55 para CEM IV/A, CEM IV/B, CEM III/A, CEM III/B, CEM V, CEM II/B ou CEM II/A-D.

A classe de teor de cloretos do betão de reparação deve ser Cl 0,4, de acordo com o Quadro 2/DNA da secção DNA 5.2.7. da NP EN 206-1.

O betão de reparação deverá também satisfazer o estabelecido no Quadro 3 da norma NP EN 1504-3 para a classe estrutural R3, se o valor da resistência à tração do betão existente (ver secção 5.3.3) for superior ou igual a 1,5 MPa e inferior a 2,0 MPa (Ribeiro 2004):

- Aderência ao betão existente (EN 1542) $\geq 1,5 \text{ MPa}$;
- Retração e expansão impedida (EN 12617-4) $\geq 1,5 \text{ MPa}$;

- Módulo de elasticidade em compressão (EN 13412) ≥ 15 GPa.

Se o valor da resistência à tração do betão existente (ver secção 5.3.3) for superior ou igual a 2,0 MPa, o betão de reparação deverá também satisfazer o estabelecido no Quadro 3 da norma NP EN 1504-3 para a classe estrutural R4:

- Aderência ao betão existente (EN 1542) $\geq 2,0$ MPa;
- Retração e expansão impedida (EN 12617-4) $\geq 2,0$ MPa;
- Módulo de elasticidade em compressão (EN 13412) ≥ 20 GPa.

A resistência ao desgaste por abrasão do betão de reparação, determinada segundo o Anexo G da norma NP EN 1338, deve ser superior à resistência à abrasão do betão existente (secção 5.3.3).

Recomenda-se, ainda, a utilização de adjuvantes redutores de retração (*"Shrinkage reducing Admixtures, SRA"*), de modo a favorecer que a secção se comporte de forma monolítica sem prejudicar a resistência de ligação entre o betão de reparação e o betão existente.

5.4.6 Seleção do Sistema de Estanquidade

O Sistema de Estanquidade (*"waterstop"*) para as juntas de contração da laje de fundo da bacia deve satisfazer o estabelecido na secção 3.3 deste Relatório.

5.4.7 Recobrimento mínimo das armaduras

O betão armado da bacia de dissipação de energia deve possuir o recobrimento mínimo exigido no Caderno de Encargos e satisfazer o valor mínimo nominal de 25 mm e 35 mm, de acordo com o Quadro 6 da especificação LNEC E 464, respetivamente, para as classes de exposição ambiental XC1 e XC2, e para uma vida útil de 50 anos.

5.4.8 Controlo de qualidade na aplicação do Sistema de Estanquidade das juntas de contração da laje de fundo

Antes da aplicação do Sistema de Estanquidade, devem ser estabelecidas e acordadas a frequência mínima de amostragem e a metodologia de ensaio *"in-situ"*, para a avaliação da estanquidade das juntas de contração da laje de fundo, bem como a ação corretiva para o caso de não conformidades.

5.4.9 Controlo de qualidade na aplicação do betão de reparação

Antes da aplicação do betão de reparação, devem ser apresentados todos os documentos que demonstrem o cumprimento das exigências aplicáveis, referentes ao betão de reparação e seus constituintes.

O controlo da consistência do betão de reparação deve ser efetuado em cada amassadura antes da aplicação, devendo rejeitar-se as amassaduras que apresentem uma consistência fora da classe de consistência previamente estabelecida.

O acabamento sem irregularidades da superfície final do betão de reparação é crucial para evitar condições favoráveis à ocorrência de fenómenos de cavitação, pelo que devem ser tomadas as

medidas necessárias para garantir a planura da superfície do betão. Caso se venham a observar irregularidades (e.g. cavidades/saliência, vazios superficiais/ninhos de pedra, entre outras), haverá que analisar a situação para agir de forma a eliminar a sua ocorrência e efetuar a reparação das irregularidades observadas.

A duração da cura do betão de reparação é crucial para sejam alcançadas as propriedades mecânicas especificadas, pelo que devem ser tomadas as medidas necessárias para o cumprimento da aplicação da Classe de cura 3 (secção 5.4.5). Caso se venham a observar fissuras no betão de reparação aplicado, haverá que analisar a situação para agir de forma a eliminar a sua ocorrência e efetuar a reparação das fissuras observadas.

A frequência mínima de amostragem para a avaliação da conformidade da resistência à compressão do betão de reparação será de 1 amostra por cada 25 m³ de betão de reparação aplicado ou 1 amostra por cada dia de betonagem. Em caso de não conformidade deve ser efetuada a revisão e/ou confirmação dos resultados para avaliar a sua causa e permitir implementar ações corretivas ou outro tipo de atuação.

Para avaliar o cumprimento da espessura do recobrimento das armaduras na bacia de dissipação de energia recomenda-se que seja efetuada uma medição pontual da espessura do recobrimento de 10 em 10 metros, num número mínimo de 20 medições (amostragem sistemática em grelha). As medições devem ser obtidas pela utilização de um aparelho para medir recobrimentos (por ex: pacómetro) verificado metrologicamente a partir de provetes de betão armado executados para o efeito, em conformidade com a BS 1881-204 e a secção A.9.2 da NP EN 1504-10. Apenas 5 % dos valores individuais medidos poderão ser inferiores ao valor do recobrimento nominal mínimo, de 25 mm (XC1) e de 35 mm (XC2), de acordo com a secção 5.4.7 deste Relatório. Em caso de não cumprimento do recobrimento mínimo especificado, deve ser efetuada a confirmação das medições com maior amostragem, para implementar a intervenção previamente definida e acordada a efetuar e de modo a diminuir esta ocorrência.

Nas paredes, laje de fundo e muro de saída da bacia reparados, e com uma frequência de amostragem de 15 em 15 metros (em grelha), deve ser determinada a aderência do betão de reparação ao betão existente, aos 28 dias de idade, segundo a NP EN 14488-4 ou a EN 1542 (ensaio de “Pull-off”), respetivamente, para betão projetado ou moldado. Os valores individuais obtidos em obra deverão ser iguais ou superiores a 1,5 MPa (R3) ou superior a 2,0 MPa (R4) (ver secção 5.4.6); valores individuais iguais ou inferiores a 1 MPa obrigarão à rejeição da reparação, e consequente remoção e substituição do betão; e, os valores entre estes dois patamares, 1 e 1,5 MPa ou 2,0 MPa, deverão ser analisados caso a caso para definição da ação a realizar.

Após os ensaios de “Pull-off” os orifícios devem ser reparados de forma a refazer a forma original, com argamassa de reparação da classe estrutural R3 ou R4, de acordo com a EN 1504-3.

5.5 Recomendações para proteger a obra até se realizar a reparação

Para as atuais condições de deterioração do betão armado da bacia de dissipação de energia (secções 4.3 a 4.5) e na sequência da análise efetuada no ponto 3.3, as condições de segurança da laje do fundo dependem de forma significativa do funcionamento eficiente da drenagem da sua fundação. Posto que a presente situação se vem arrastando há muitos anos, recomenda-se que, enquanto não se proceder à reparação da bacia, se tente avaliar o funcionamento do sistema de drenagem através da medição da variação do caudal recolhido no poço de drenagem identificado na Figura A.1 aquando de descargas com os orifícios descarregadores. Se a drenagem estiver a funcionar (o que será vantajoso em termos de subpressões) será de esperar um aumento dos caudais afluentes a este poço, devido à transmissão das pressões dinâmicas à fundação e do escoamento que se deverá gerar na fundação com origem nas juntas com o “*waterstop*” danificado.

Por forma a minimizar o risco de deterioração adicional da bacia de dissipação, ou mesmo da sua destruição por deslocamento das lajes de proteção do fundo (ver secção 3.3), recomenda-se que, na medida do possível, se proceda à transferência de volumes de água para a albufeira do Arade usando o “*by-pass*” da tomada de água. Segundo informação prestadas durante a visita de inspeção de 28 de outubro de 2015, este “*by-pass*” permite descarregar água para a bacia de dissipação a partir da câmara de válvulas da tomada de água situada junto ao coroamento do muro do lado direito. Usando esta alternativa, será naturalmente necessário manter o “*by-pass*” aberto por períodos bastante mais prolongados do que operando com os orifícios do descarregador, mas, em contrapartida, a energia a dissipar na bacia será muito menor do que a associada à operação dos orifícios destes. Acresce ainda que, se bem que sem relevância para o assunto em análise, usando o “*by-pass*” a qualidade da água será maior, dado que a captação passará a ter origem na tomada de água, a qual permite captar na albufeira a uma cota mais elevada.

5.6 Síntese das recomendações para o projeto e empreitada

Das recomendações complementares para a elaboração do projeto e empreitada de reabilitação da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho, salientam-se os seguintes aspetos:

- a) A reparação da bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho deve repor a integridade estrutural dos elementos de betão armado, corrigindo as anomalias existentes e conferindo a resistência mecânica mínima contra a lixiviação (agressividade química da água da bacia) e a ação hidráulica do escoamento sem transporte de sólidos, para uma vida útil de 50 anos, de acordo com o estabelecido na especificação LNEC E 464.

Do ponto de vista do funcionamento hidráulico, a reparação deve também repor a integridade das juntas de contração da laje de fundo da bacia, no que respeita à estanquidade e deformação (de modo a evitar a fendilhação da laje), e garantir uma superfície de contato com o escoamento adequada para evitar condições favoráveis à ocorrência de cavitação.

- b) A metodologia de intervenção da bacia subentende que será eliminada a principal causa da erosão do betão da bacia, através da implementação de uma solução estável de proteção das encostas das margens e do leito do canal de restituição a jusante da bacia de dissipação de energia, que se considera deverá ser objeto de um projeto de especialidade. Esta nova solução deve ser capaz de eliminar definitivamente a possibilidade do arrastamento/movimento de material sólido de dimensão significativa para o interior da bacia de dissipação.
- c) Os trabalhos de reparação deverão consistir, primeiramente, na remoção do betão degradado em profundidade, de acordo com o nível de degradação definido, e na remoção do Sistema de Estanquidade das juntas (*"waterstop"*), deteriorado ou com defeitos. Segue-se a preparação das superfícies das armaduras e sua complementação/substituição, de acordo com o projeto original, quando necessário, bem como a preparação da superfície do betão exposta que irá funcionar como superfície de colagem do betão de reparação. Seguir-se-ão os trabalhos de reparação, que devem consistir na reconstituição das juntas de contração da laje de fundo, incluindo a aplicação do novo Sistema de Estanquidade, e na colocação de um betão de reparação de qualidade e recobrimento em conformidade com as exigências regulamentares em vigor para o ambiente em que se insere a bacia.
- d) Como trabalhos finais de reparação, a cura e a superfície final do betão de reparação serão cruciais para garantir a durabilidade do mesmo, no que respeita à prevenção de fenómenos de cavitação e na garantia da resistência ao desgaste por abrasão.
- e) Os trabalhos de reparação deverão seguir o especificado na série de normas NP EN 1504, no aplicável.

6 | Conclusões

A bacia de dissipação de energia da Barragem do Funcho apresenta sinais visíveis de degradação do betão armado, sendo que o descarregador de cheias funciona regularmente desde a entrada em serviço da obra, uma vez que também é um órgão usado na exploração da barragem para assegurar a transferência regular de água da albufeira do Funcho para jusante, para a albufeira da barragem do Arade.

Aquando da operação do descarregador, as condições de turbulência e de assimetria bem como as recirculações do escoamento dentro da bacia e na zona imediatamente a jusante, são propícias para o carreamento de blocos do enrocamento de proteção do leito e dos taludes do canal a jusante para o interior da bacia de dissipação.

O betão armado da bacia insere-se nas classes de exposição ambiental XC1 e XC2 (corrosão induzida por carbonatação) e eventualmente na classe de exposição XA1 (ataque químico), segundo a NP EN 206-1.

A inspeção visual realizada no local identificou dois níveis de degradação do betão armado da bacia, resultante do ataque químico da água da bacia e da erosão do betão devido ao desgaste provocado pela fricção e polimento dos blocos de enrocamento transportados pela água para o interior da bacia.

O sistema de estanquidade das juntas de contração das lajes do fundo da bacia está danificado em diversos locais. Nestas circunstâncias, é elevada a probabilidade de transmissão das pressões dinâmicas associadas ao funcionamento dos orifícios descarregadores à fundação das lajes da bacia (originando subpressões significativas). Esta situação é particularmente gravosa para a segurança das lajes do fundo da bacia de dissipação, sendo por isso recomendada a sua reparação.

A metodologia de intervenção para a reabilitação da bacia consiste na remoção do betão degradado e do Sistema de Estanquidade das juntas deteriorado ou com defeitos; na preparação das superfícies das armaduras e sua complementação/substituição, bem como na preparação da superfície do betão exposta; reconstituição das juntas de contração da laje de fundo e colocação de um betão de reparação com a qualidade e espessura que vierem a ser definidas.

A metodologia recomendada visa prolongar o tempo de vida útil da bacia, tendo como horizonte uma vida útil adicional de 50 anos.

VISTOS

AUTORIA

A Chefe do Núcleo de Recurso Hídricos e
Estruturas Hidráulicas

Maria Teresa Viseu

Maria Sofia Sousa Ribeiro
Investigadora Auxiliar

A Diretora do Departamento de
Hidráulica e Ambiente

Helena Alegre

José Falcão de Melo
Investigador Auxiliar

O Chefe do Núcleo de Betões, Pedra e
Cerâmicos

António Bettencourt Ribeiro

O Diretor do Departamento de Materiais

Arlindo Gonçalves

Referências

- ATA Nº1, 2003 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, janeiro.
- ATA Nº2, 2004 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, março
- ATA Nº3, 2005 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, novembro
- ATA Nº4, 2006 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, novembro
- ATA Nº5, 2007 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, julho
- ATA Nº6, 2008 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, dezembro
- ATA Nº7, 2009 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, outubro
- ATA Nº8, 2010 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, outubro
- ATA Nº9, 2011 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, outubro
- ATA Nº10, 2012 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, março
- ATA Nº11, 2013 – **Visita de inspeção à Barragem do Funcho**. INAG/LNEC, março
- BUREC, 1996 – **Guide to concrete repair** - Technical Service Center, Bureau of Reclamation, United States Department of the Interior.
- Diretoria de Engenharia, 2006 – **Especificação Técnica - Procedimentos para a substituição de armaduras corroídas**. ET-DE-C00/014 Ref.A, Secretaria de Transportes, Departamento de Estradas de Rodagem.
- DNIT 084 ES: 2006 – **Tratamento da corrosão**. Especificação de Serviço, 2006. American Concrete Institute, ACI 116R-78.
- Emmons, P. H, 1994 – **Concrete Repair and Maintenance Illustrated. Problem Analysis. Repair Strategy. Techniques**. Kingston: R. S. Means.
- ICRI, 2010 – **International Concrete Repair Institute**.
- LNEC, 1987 – **Barragem do Funcho. Estudo hidráulico em modelo reduzido das estruturas de descarga de cheias**. LNEC - Proc. 65/1/8618. Relatório 221/87 NHE.
- LNEC, 1992 – **Barragem do Funcho. Estudos complementares da bacia de dissipação**. LNEC - Proc. 065/1/9795. Relatório 156/92 NHE.
- LNEC, 1993 – **Verificação da qualidade dos betões da Barragem do Funcho**. LNEC - Proc. 022/1/9062. Relatório 14/93 NAB.
- LNEC, 1996 – **Observação hidroquímica da Barragem do Funcho. Compilação e análise sucinta de resultados**. LNEC - Proc. 43/01/8807. Relatório 219/96 NO.
- MELO, J. F., 2001 – **Ações hidrodinâmicas em soleiras de bacias de dissipação de energia por jatos**. Dissertação elaborada no LNEC para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pelo IST, no âmbito do protocolo de cooperação entre IST e LNEC, Janeiro, Lisboa (ISBN: 978-972-49-1933-1).
- NP 1414: 1977 – **Águas. Colheita das amostras de águas de amassadura e de águas em contacto com betões**.

- NP EN 1008: 2003 – **Água de amassadura para betão - Especificações para a amostragem, ensaio e avaliação da aptidão da água, incluindo água recuperada nos processos da indústria de betão, para o fabrico de betão.**
- NP EN 1504 -3: 2006 – **Produtos e sistemas para a proteção e reparação de estruturas de betão. Definições., Parte 3: Reparação estrutural e não estrutural.** Instituto Português da Qualidade, 2006.
- NP EN 13670:2011-pt – **Execução de estruturas de betão.**
- NP EN 13670:2011/Emenda 1:2012-pt – **Execução de estruturas de betão.**
- NP ISO 17660-1:2006 – **Welding of reinforcing steel Part 1: Load-bearing welded joints.**
- RAMOS, C. M., 1999 – Barragem do Funcho. **Reapreciação das condições de dissipação de energia e das proteções do canal de restituição. Avaliação do comportamento da bacia de dissipação de energia e definição de medidas de reabilitação.** Relatório, Outubro, Lisboa.
- RIBEIRO, M. S., 2004 – **Argamassas Cimentícias Modificadas com adjuvantes Poliméricos. Composição e características.** Dissertação elaborada no LNEC para obtenção do grau de Doutor em Engenharia civil pelo IST, no âmbito do no âmbito do protocolo de cooperação entre IST e LNEC, Janeiro, Lisboa.

ANEXO

Desenhos e reportagem fotográfica da inspeção de 2015-10-28

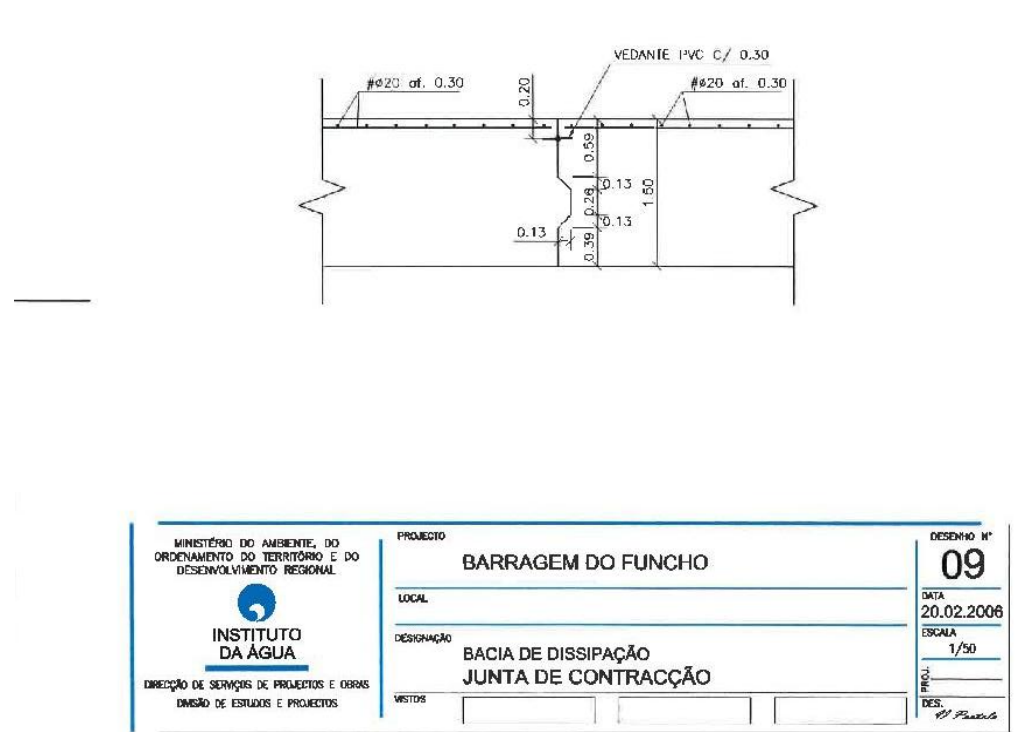


Figura A.2 – Pormenor de uma junta de contração [APA]

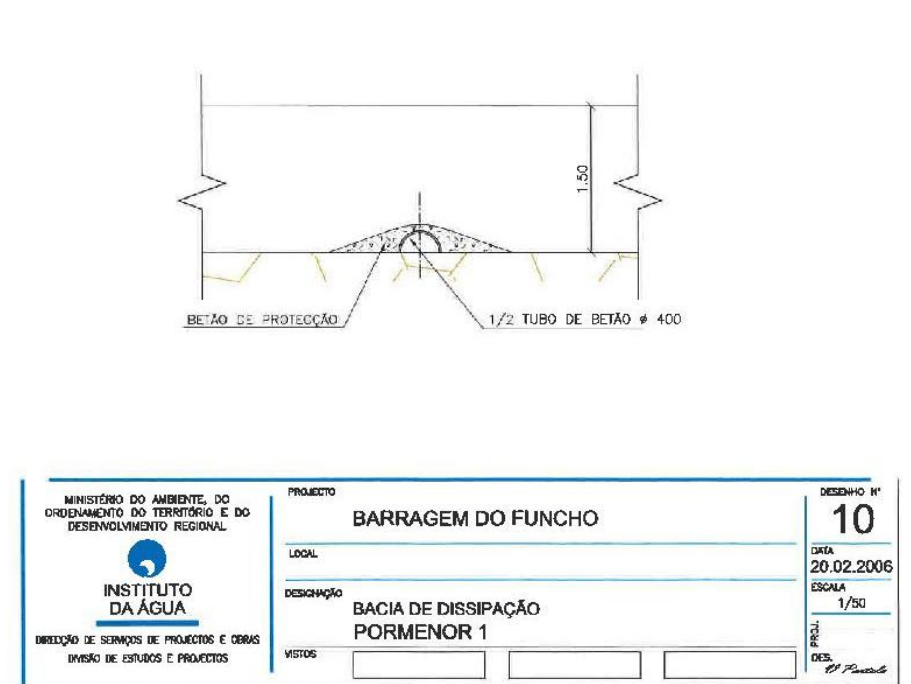


Figura A.3 – Pormenor de um dreno [APA]

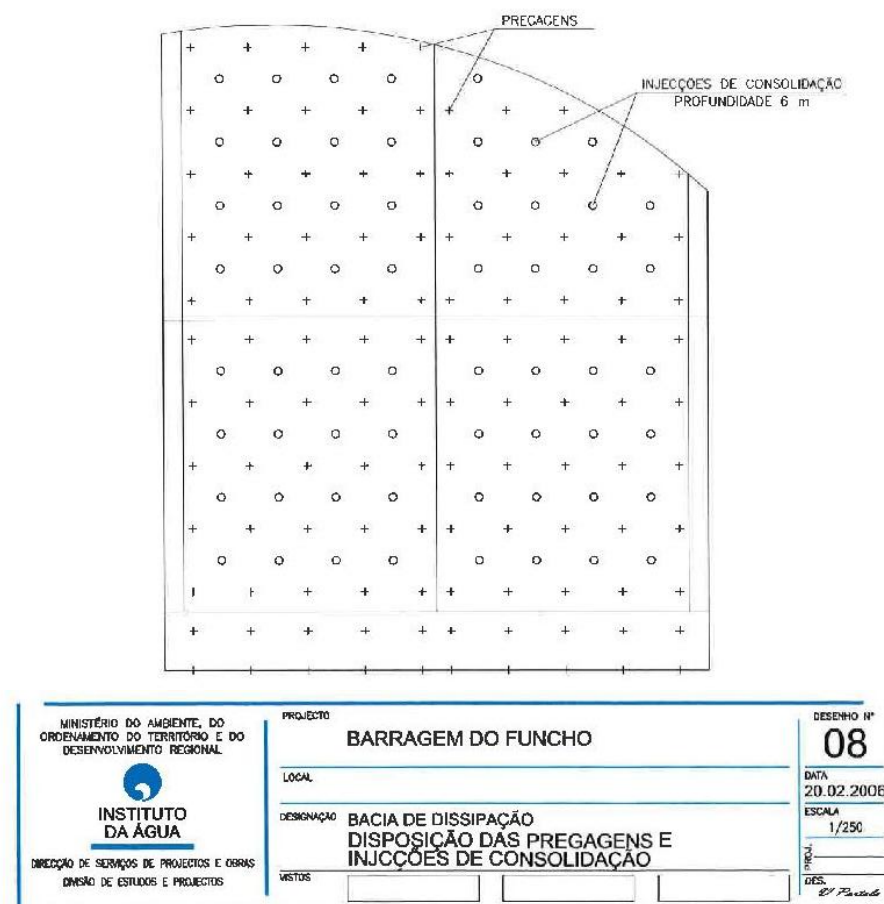


Figura A.4 – Disposições das pregagens e injeções de consolidação [APA]

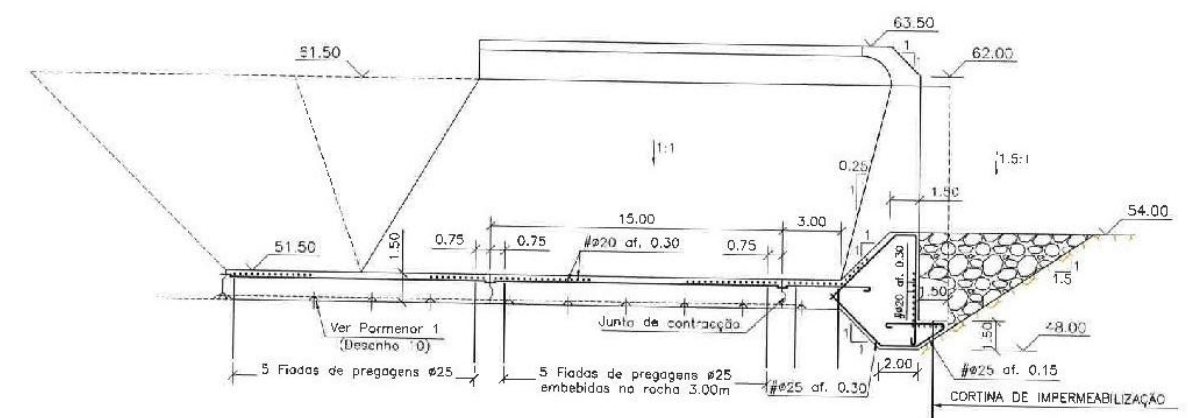
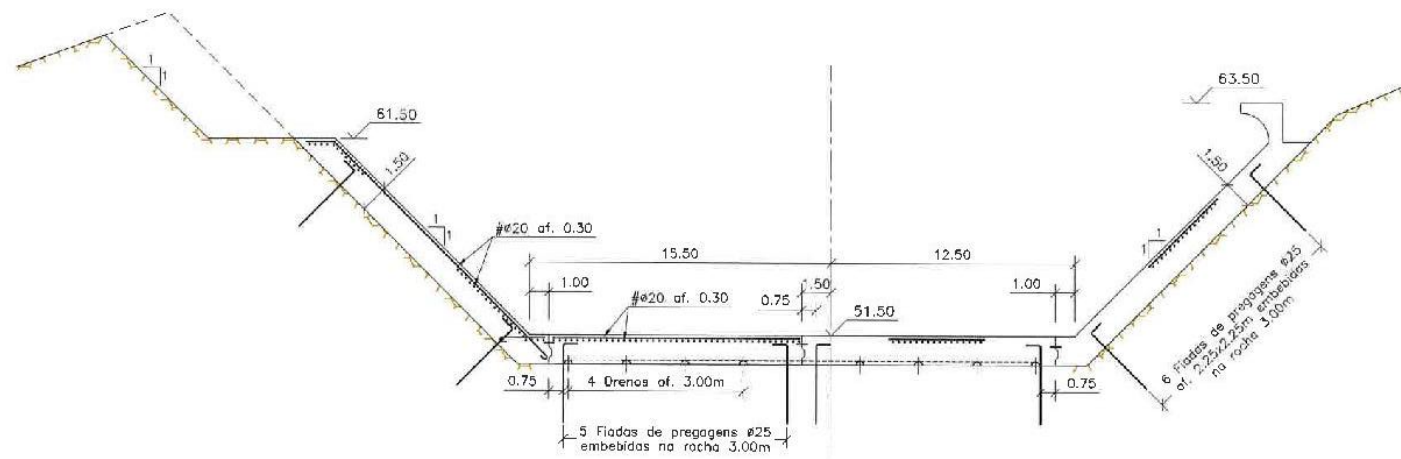
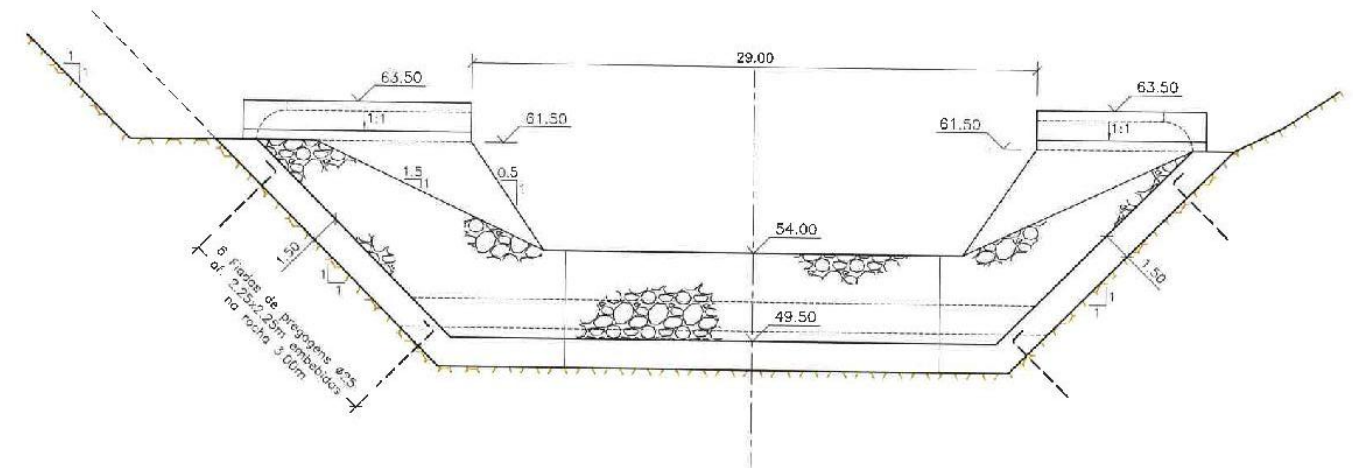


Figura A.5 – Corte A-A. Bacia de dissipação (Figura A.1) [APA]



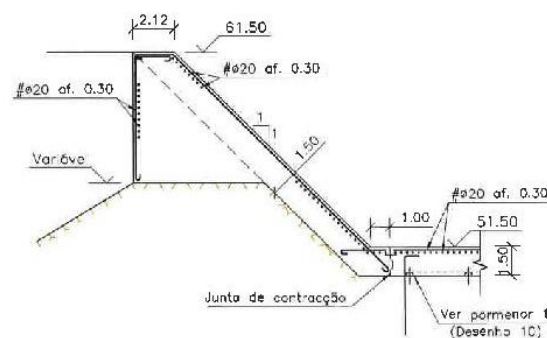
MINISTÉRIO DO AMBIENTE, DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL INSTITUTO DA ÁGUA DIRECÇÃO DE SERVIÇOS DE PROJECTOS E OBRAS DIVISÃO DE ESTUDOS E PROJECTOS	PROJECTO	BARRAGEM DO FUNCHO	DESENHO Nº	03
	LOCAL		DATA	17.02.2006
	DESIGNAÇÃO	BACIA DE DISSIPAÇÃO CORTE B-B	ESCALA	1/250
	VISTOS		PROJ.	
			DES.	F. Aguiar

Figura A.6 – Corte C-C. Bacia de dissipação (Figura A.1) [APA]



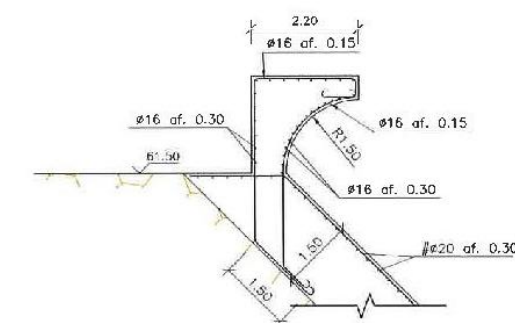
MINISTÉRIO DO AMBIENTE, DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL INSTITUTO DA ÁGUA DIRECÇÃO DE SERVIÇOS DE PROJECTOS E OBRAS DIVISÃO DE ESTUDOS E PROJECTOS	PROJECTO	BARRAGEM DO FUNCHO	DESENHO Nº	04
	LOCAL		DATA	20.02.2006
	DESIGNAÇÃO	BACIA DE DISSIPAÇÃO CORTE C-C	ESCALA	1/250
	VISTOS		PROJ.	
			DES.	F. Aguiar

Figura A.7 – Corte C-C. Bacia de dissipação (Figura A.1) [APA]



MINISTÉRIO DO AMBIENTE, DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL INSTITUTO DA ÁGUA DIRECÇÃO DE SERVIÇOS DE PROJECTOS E OBRAS DIVISÃO DE ESTUDOS E PROJECTOS	PROJECTO	BARRAGEM DO FUNCHO	DESENHO Nº	05
	LOCAL		DATA	22.02.2006
	DESIGNAÇÃO	BACIA DE DISSIPAÇÃO CORTE D-D	ESCALA	1/250
	VISTOS		PROJ.	
			DES.	F. Aguiar

Figura A.8 – Corte D-D. Bacia de dissipação (Figura A.1) [APA]



MINISTÉRIO DO AMBIENTE, DO ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL INSTITUTO DA ÁGUA DIRECÇÃO DE SERVIÇOS DE PROJECTOS E OBRAS DIVISÃO DE ESTUDOS E PROJECTOS	PROJECTO	BARRAGEM DO FUNCHO	DESENHO Nº	06
	LOCAL		DATA	20.02.2006
	DESIGNAÇÃO	BACIA DE DISSIPAÇÃO CORTE E - E	ESCALA	1/100
	VISTOS		PROJ.	
			DES.	F. Aguiar

Figura A.9 – Corte E-E. Bacia de dissipação (Figura A.1) [APA]

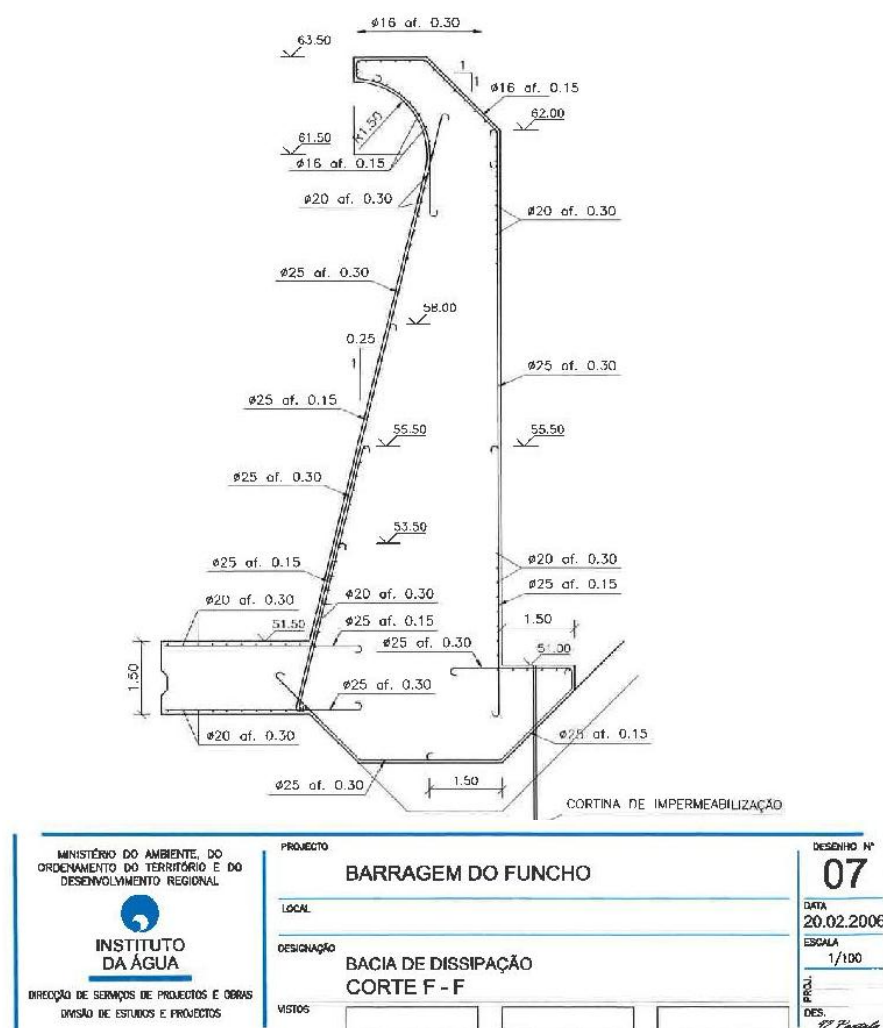


Figura A.10 – Corte F-F. Bacia de dissipação (Figura A.1) [APA]



Figura A.11 – Aspeto geral da bacia de dissipação e do canal de restituição imediatamente a jusante (2015)



Figura A.12 – Desenvolvimento de incrustações em fissuras no betão: corpo a jusante da barragem e parede lateral direita da bacia de dissipação (2015)



Figura A.13 – Exposição de armaduras corroídas. Coroamento e posto de comando local das comportas (2015)



1996



2004



2013



2015

Figura A.14 – Área com delaminação do betão de recobrimento e exposição de armaduras corroídas



1996



2004

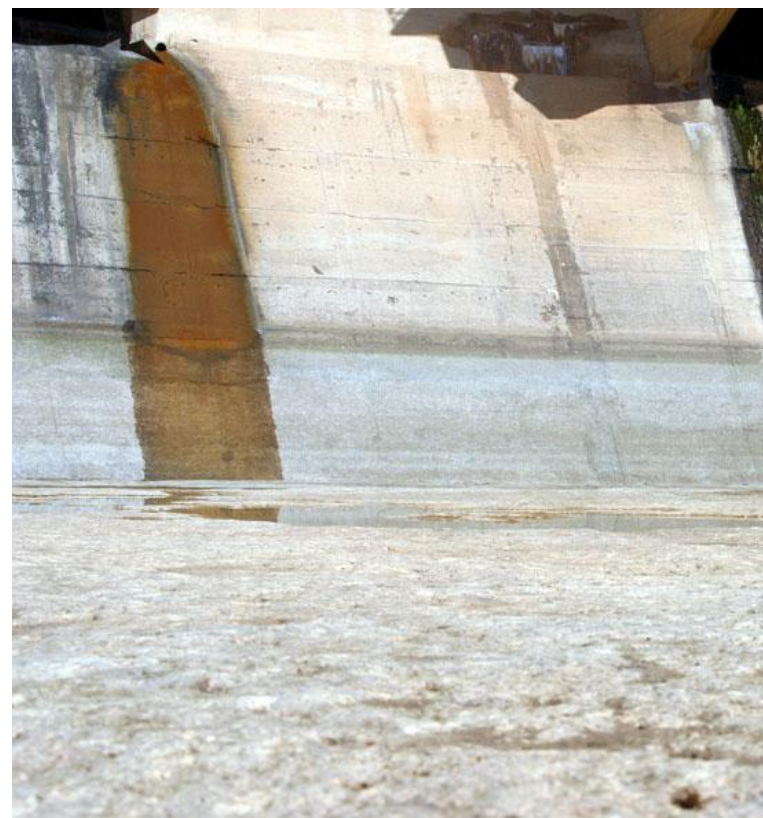


2013

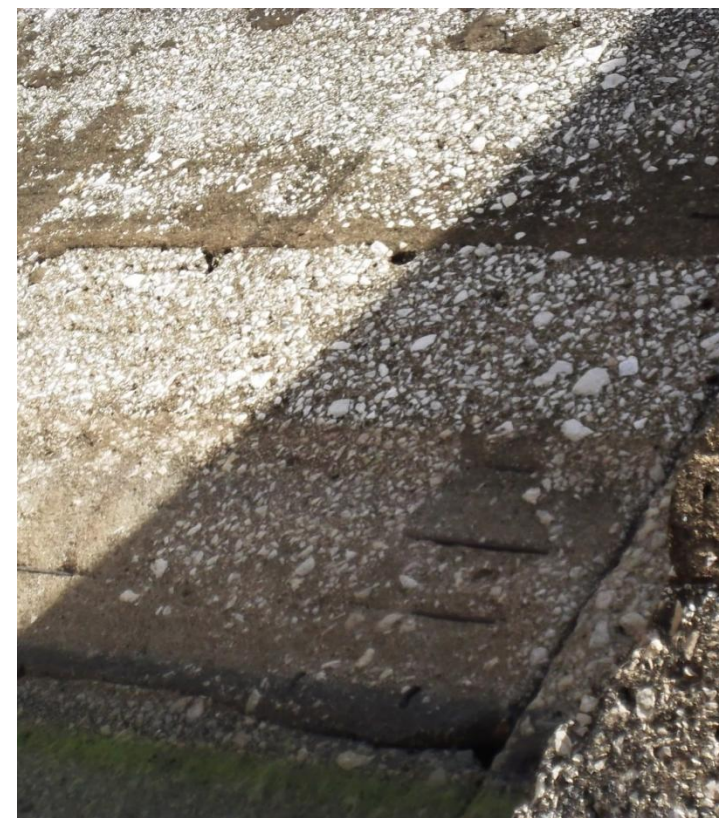
Figura A.15 – Linha de água nas paredes da bacia



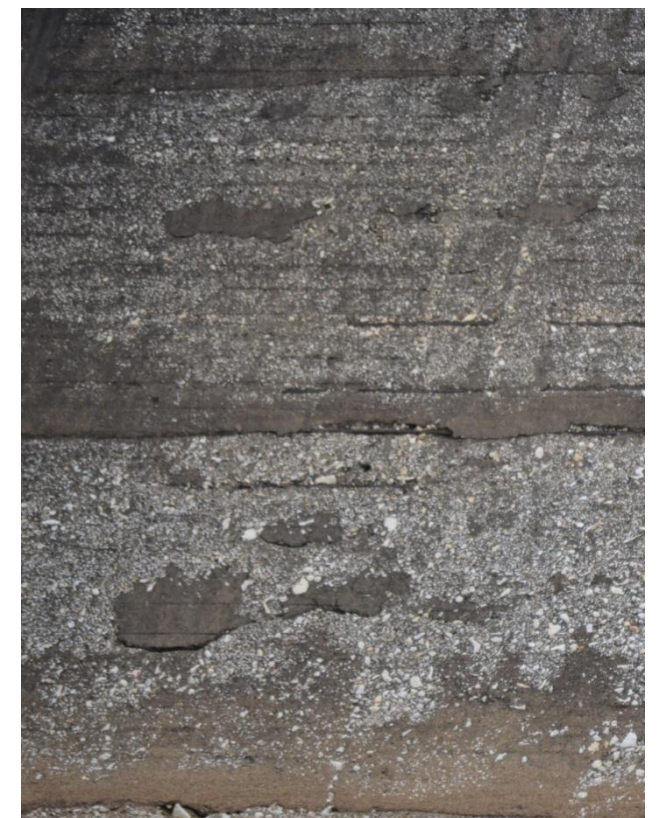
1996



2004



2013

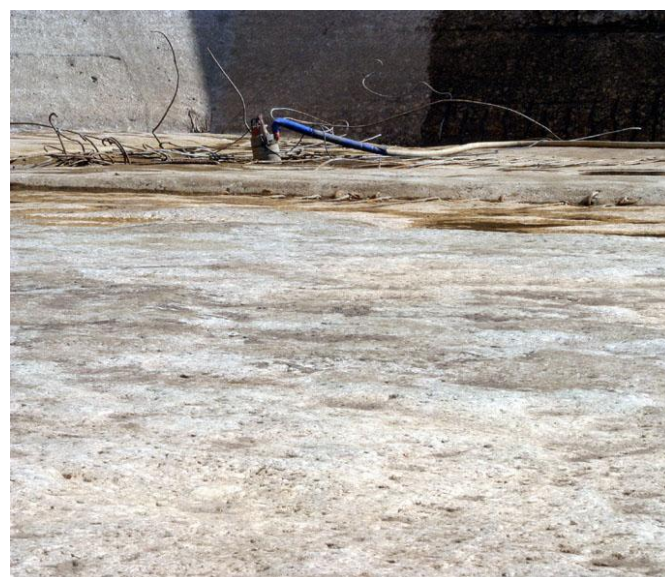


2015

Figura A.16 – Aspeto rugoso do betão das paredes da bacia, com exposição dos agregados



1996



2004



2013

Figura A.17 – Aspeto polido do betão do coroamento do degrau de saída e da laje de fundo, com irregularidades na superfície e com exposição de armaduras corroídas



1996



2004



2013

Figura A.18 – Armaduras expostas corroídas nas paredes e na laje de fundo da bacia de dissipação



1996



2004

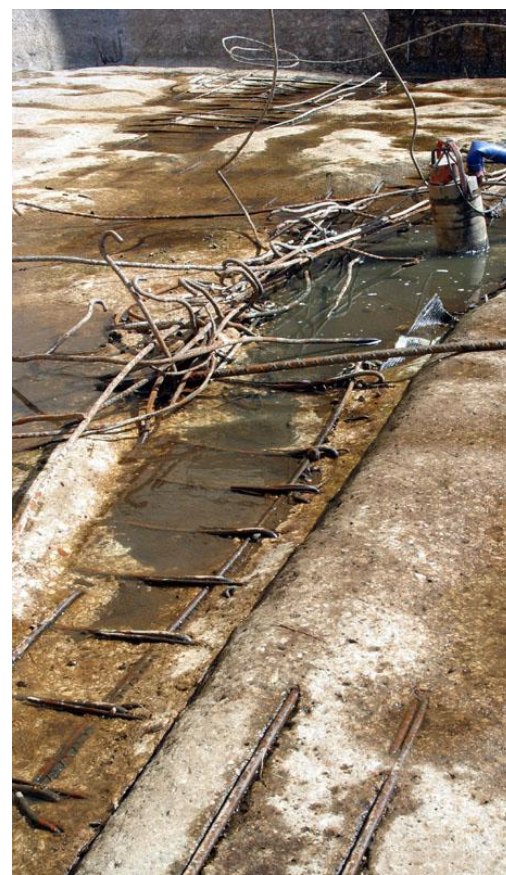


2013

Figura A.19 – Degradação das juntas de contração da laje de fundo de armaduras



2004



2013

Figura A.20 – Degradação das juntas de contração da laje de fundo com exposição do vedante deteriorado



1996



2004



2013

Figura A.21 – Deterioração da aresta de interseção das paredes com a laje de fundo



1996



2004



2013

Figura A.22 – Deterioração da parede do muro do degrau de saída com maior intensidade no coroamento e junto da laje de fundo



1996

2004

Figura A.23 – Arrastamento do material sólido de proteção da margem esquerda do canal a jusante da bacia. Maior intensidade da deterioração no lado sudeste, margem esquerda da bacia



1992

2015

Figura A.24 – Proteção com enrocamento da margem esquerda a jusante

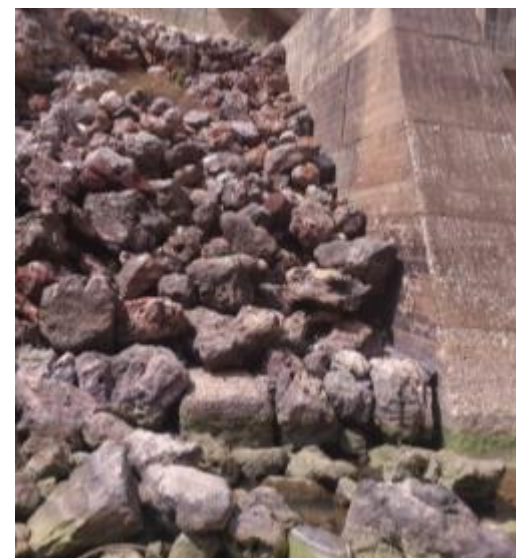


2013



2015

Figura A.25 – Aspeto do betão do topo das paredes devido à proteção solar do muro defletor



2013

Figura A.26 – Proteção dos taludes das margens a jusante da bacia (margens esq. e direita).



2013

Figura A.27 – Blocos de enrocamento no interior da bacia: com “aresta viva” e” superfície rolada “





2015

Figura A.28 – Proteção dos taludes das margens a jusante da bacia, com indícios de desmoronamentos com indícios de desmoronamentos



Figura A.29 – Medição da profundidade de carbonatação do betão na face externa da parede direita da bacia, na aresta do muro refletor com a parede (acima do nível do enrocamento)

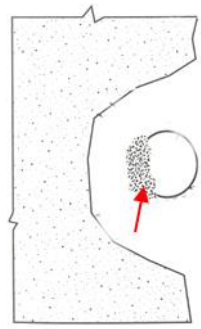


Figura A.30 – Camada de óxidos de corrosão não removidos

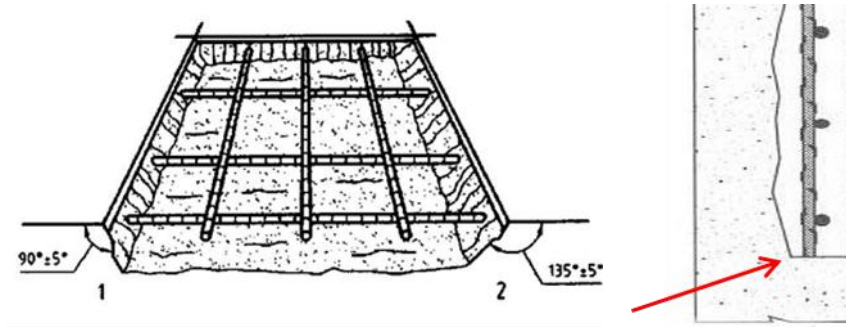


Figura A.31 – Geometria da fronteira da remoção do betão

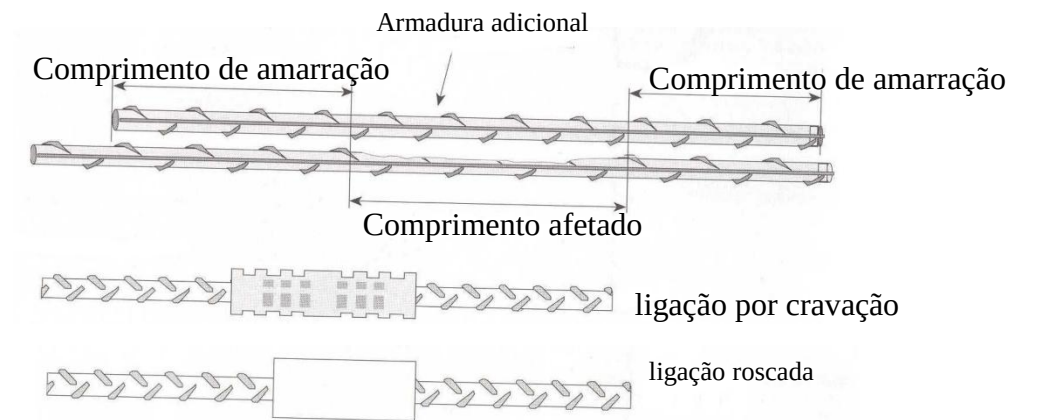


Figura A.32 – Métodos de reparação de armaduras

