

## **Contributo do LNEC nos estudos de apoio ao projeto recente de doze grandes barragens de betão**

**Carlos Pina**<sup>1</sup>   **José Vieira de Lemos**<sup>2</sup>   **Luís Lamas**<sup>3</sup>   **António Lopes Batista**<sup>4</sup>   **Teresa Viseu**<sup>5</sup>

### **RESUMO**

Apresentam-se os aspetos relevantes dos estudos realizados pelo LNEC no apoio ao projeto recente de doze grandes barragens de betão, todas integradas nos novos aproveitamentos hidroelétricos. A intervenção do LNEC envolveu um vasto conjunto de atividades, nomeadamente: o estudo dos maciços rochosos de fundação, incluindo ensaios de campo e laboratório; os estudos em modelo matemático para análise da segurança estrutural, considerando, em particular, as ações sísmicas e os cenários de degradação do betão e de rotura pela fundação; ensaios em modelo físico dos sistemas hidráulicos; e elaboração de planos de observação.

**Palavras-chave:** barragens de betão, projeto, maciços rochosos, cenários correntes e de rotura, plano de observação, ensaios hidráulicos

### **1. INTRODUÇÃO**

Desde a sua criação, em 1946, o LNEC tem dado um apoio significativo ao projeto de barragens de betão, tanto em Portugal como no estrangeiro, em estudos relacionados com a caracterização dos maciços rochosos de fundação, a definição de formas estruturais e hidráulicas, utilizando modelação física e matemática, a análise estrutural por métodos experimentais e numéricos, bem como o planeamento das atividades de observação e controlo da segurança. Apenas a título de exemplo podem destacar-se os casos das barragens do Cabril (135 m de altura), Alto Lindoso (110 m de altura) e Alqueva (96 m de altura e uma albufeira com cerca de 4.000 hm<sup>3</sup>), em Portugal, as barragens de Almendra (202 m de altura) e de Aldeadávila (140 m de altura), em Espanha, e a barragem de Cahora Bassa (170 m de altura e uma albufeira com cerca de 66.000 hm<sup>3</sup>), em Moçambique.

No sentido de reduzir a dependência energética de Portugal, retomou-se, há cerca de quatro anos, o plano de construção de grandes aproveitamentos hidroelétricos. Nessa altura encontravam-se já em fase de projeto as barragens de Ribeiradio e Ermida, no rio Vouga, as barragens de montante e de jusante do Baixo Sabor e a nova barragem do Alto Ceira, destinada a substituir a obra existente, irremediavelmente deteriorada devido a reações expansivas de origem interna do betão. Em concurso promovido em 2008 pelo estado português, no âmbito do Programa Nacional de Barragens com Elevado Potencial Hidroelétrico (PNBEPH), foram concessionadas as barragens de Foz Tua, Alvito (rio Ocreza), Alto Tâmega, Daivões, Gouvães e Fridão (montante e jusante), na bacia do rio Tâmega, e Girabolhos e Bogueira, no médio Mondego. Todas estas barragens serão de betão, com exceção da

---

<sup>1</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, cpina@lneec.pt

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, vlemos@lneec.pt

<sup>3</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, llamas@lneec.pt

<sup>4</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, a.l.batista@lneec.pt

<sup>5</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, tviseu@lneec.pt

barragem da Bogueira (contraembalse de Girabolhos), perfazendo um número total de 13 a serem construídas com este tipo de material.

Na presente comunicação apresentam-se os aspetos relevantes dos estudos realizados pelo LNEC no apoio ao projeto recente de doze das treze grandes barragens de betão referidas (na barragem de Ermida, de menores dimensões, o LNEC apenas fez a revisão do plano de observação, no âmbito das suas atribuições legais [1]). A intervenção do LNEC envolveu um vasto conjunto de atividades, nomeadamente: o estudo dos maciços rochosos de fundação, incluindo ensaios de campo e laboratório; os estudos em modelo matemático para análise da segurança estrutural, considerando, em particular, as ações sísmicas e os cenários de degradação do betão e de rotura pela fundação; ensaios em modelo físico dos sistemas hidráulicos; e elaboração de planos de observação (Quadro 1).

Quadro 1. Estudos realizados pelo LNEC no apoio ao projeto recente de doze grandes barragens de betão

| <i>Barragem</i>        | <i>Tipo estrutural</i> | <i>Altura (m)</i> | <i>Caracterização geomecânica do local de implantação</i> | <i>Análise de cenários correntes e de rotura</i> | <i>Elaboração (E) ou revisão (R) de planos de observação</i> | <i>Ensaio em modelo físico de sistemas hidráulicos</i> |
|------------------------|------------------------|-------------------|---|--|--|--|
| Alto Ceira             | Abóbada                | 41,00             | •   | •  | R  | •  |
| Baixo Sabor (montante) | Abóbada                | 123,00            | •   | •  | R  | •  |
| Baixo Sabor (jusante)  | Gravidade              | 45,00             | •   | •  | R  | •  |
| Ribeiradio             | Arco-gravidade         | 83,00             | •   | •  | R  | •  |
| Foz Tua                | Abóbada                | 108,00            | •   | •  | R  | •  |
| Fridão (montante)      | Abóbada                | 98,00             | •   | •  | R  | •  |
| Fridão (jusante)       | Gravidade              | 34,00             | •   | -  | R  | •  |
| Alvito                 | Gravidade (BCC)        | 89,00             | •   | •  | E  | •  |
| Alto Tâmega            | Abóbada                | 106,50            | •   | •  | E  | •  |
| Daivões                | Arco-gravidade         | 77,50             | •   | •  | E  | •  |
| Gouvães                | Gravidade              | 30,00             | •   | -  | E  | -  |
| Girabolhos             | Abóbada                | 105,50            | •   | •  | E  | •  |

Estes estudos foram realizados diretamente para os concessionários ou para as empresas encarregues da elaboração dos projetos, fechando o conjunto de estudos por forma a dar-se satisfação aos requisitos da regulamentação portuguesa de segurança de barragens [1, 2, 3].

## **2. LOCALIZAÇÃO E CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS BARRAGENS**

Na Fig. 1 representa-se a localização das doze barragens em apreço. Nos afluentes da margem direita do rio Douro estão situadas oito barragens e no centro do país, entre os rios Douro e Tejo, localizam-se as restantes quatro barragens. Nos locais de implantação ocorrem maciços rochosos de fundação com competência para servirem de apoio às barragens e respetivas obras anexas.



### 3. CARACTERIZAÇÃO GEOMECÂNICA DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Para caracterização geomecânica dos maciços rochosos de fundação das barragens, bem como das obras subterrâneas associadas, foi realizado um vasto conjunto de estudos, incluindo principalmente ensaios de campo e de laboratório [4 a 22].

Foram efetuados levantamentos da compartimentação dos maciços de fundação das barragens de Fridão (montante) e de Baixo Sabor (montante), que, mediante a utilização de métodos estatísticos apropriados, permitiram caracterizar geometricamente as principais famílias de descontinuidades.

Os ensaios de campo realizados nos maciços rochosos de fundação das barragens tiveram como objetivo caracterizar a sua deformabilidade. Foram realizados pelo LNEC ensaios dilatométricos (BHD) para as fundações de todas as barragens referidas neste trabalho, com exceção de Girabolhos. Estes ensaios realizam-se em furos de sondagem e consistem na aplicação de pressões radiais nas paredes dos furos e na medição das correspondentes deformações do maciço, possibilitando dessa forma a caracterização da sua deformabilidade até profundidades da ordem dos 100 m. Foram também realizados ensaios de almofadas planas de grande área (LFJ) (Fig. 2), com os quais é possível envolver um maior volume de maciço rochoso e, desta forma, obter uma melhor caracterização da sua deformabilidade. O LNEC realizou estes ensaios para estudo das fundações das barragens de Daivões, Alto Tâmega, Fridão (montante), Ribeiradio, Foz Tua, Alvito e Baixo Sabor.

Para os circuitos hidráulicos das barragens de Baixo Sabor, Foz Tua e Alvito, o LNEC realizou ainda ensaios de campo para medição do estado de tensão *in situ*, por uma técnica de sobre-carotagem, utilizando um defórmeter tridimensional instalado num furo de sondagem de pequeno diâmetro (STT).

No laboratório foi executado um grande número de ensaios, sendo de destacar os ensaios de deslizamento de descontinuidades (Fig. 3) para caracterização da sua resistência e deformabilidade. Estes ensaios foram realizados pelo LNEC para todas as barragens com exceção de Girabolhos. Foram também realizados ensaios triaxiais em provetes de rocha dos circuitos hidráulicos de Foz Tua e do Alvito, bem como da fundação da barragem de Gouvães, para caracterização da sua resistência.



Figura 2. Ensaio LFJ



Figura 3. Ensaio de deslizamento de diaclases

### 4. ANÁLISE DE CENÁRIOS CORRENTES E DE ROTURA

Os estudos de análise estrutural para apoio ao projeto das novas barragens compreenderam a análise em modelos numéricos das diversas situações de projeto, nomeadamente de cenários correntes de exploração e de cenários de rotura, tendo-se centrado principalmente nestes últimos [23 a 43].

Estudos de cenários correntes, no âmbito da análise das formas estruturais, foram efetuados para a barragem de arco-gravidade de Ribeiradio, com base no modelo de elementos finitos tridimensionais representado na Fig. 4. Para esta obra, foram também analisados os efeitos da ação sísmica, designadamente do Sismo Base de Projeto (SBP) e do Sismo Máximo de Projeto (SMP), quer no que

respeita às tensões induzidas na barragem, quer avaliando a possibilidade de deslizamento pela superfície de fundação. Estudos de cenários de deslizamento ao longo da superfície de fundação sob ação do SMP, com base em modelos bidimensionais de elementos discretos, foram realizados para a barragem de gravidade do Baixo Sabor (jusante) e para a barragem do Alvito (Fig. 5). Para o arco-gravidade de Daihões foram desenvolvidos estudo de rotura pela fundação, considerando quer a ligação betão-rocha, quer as descontinuidades do maciço rochoso. Nestes estudos foi utilizado um modelo de elementos discretos tridimensional (Fig. 6), com base numa representação do maciço rochoso através de um sistema de blocos, sendo consideradas as ações estáticas e as ações sísmicas.

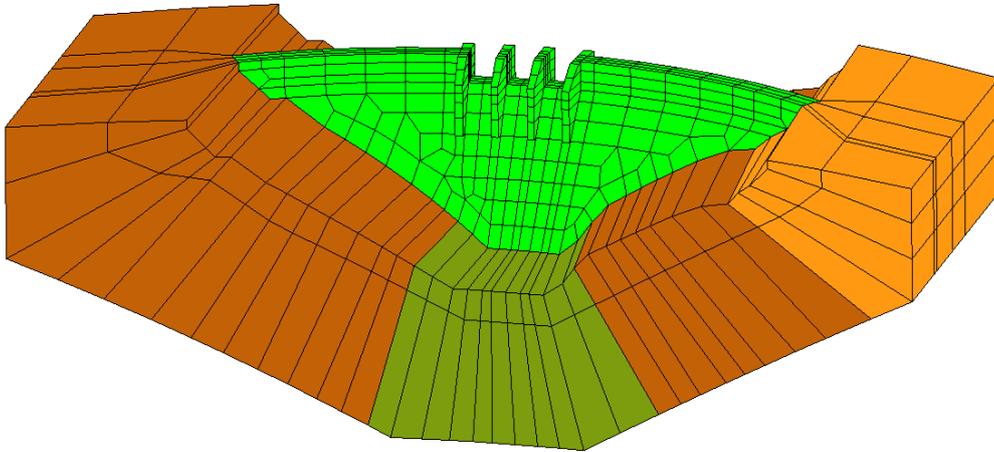


Figura 4. Modelo de elementos finitos para estudo do comportamento estrutural da barragem de Ribeiradio.

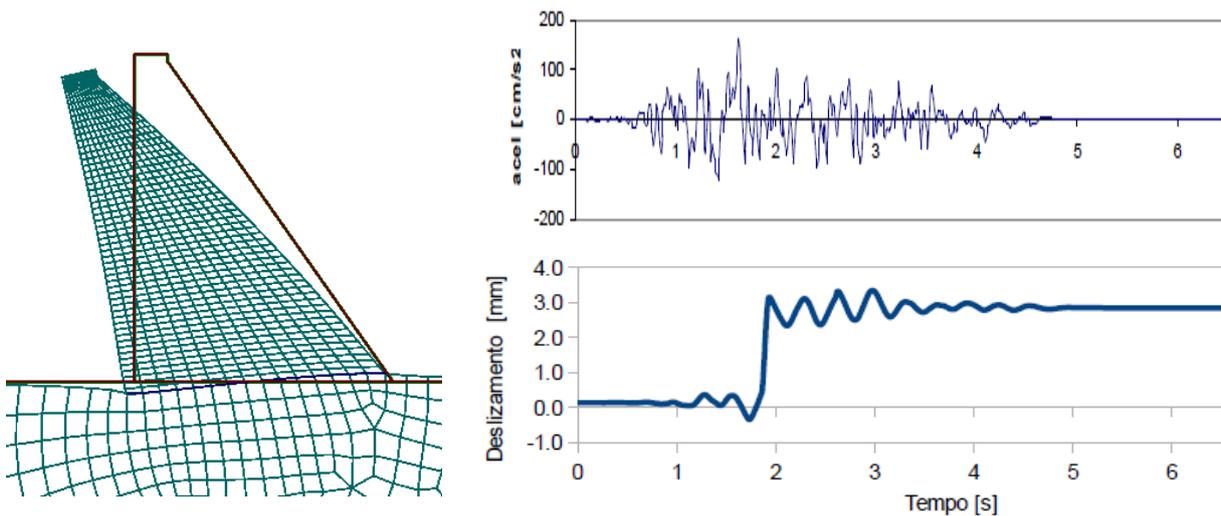


Figura 5. Modelo plano de elementos discretos da barragem do Alvito. Configuração do primeiro modo de vibração, acelerograma para o SMP e resposta estrutural em termos de deslizamento pela superfície da base.

No caso das barragens abóbada, o estudo dos cenários de rotura compreende habitualmente 3 tipos distintos de análise. Em primeiro lugar, a avaliação da capacidade última da abóbada de betão, que corresponde ao cenário de deterioração do betão, no qual se faz uma estimativa do coeficiente de segurança global da estrutura através da minoração progressiva da resistência do betão. Os modelos numéricos que têm sido utilizados no LNEC para este fim baseiam-se numa representação constitutiva do betão por uma formulação de dano contínuo isotrópico, com duas variáveis de dano independentes, para a tração e a compressão. O estudo deste cenário foi conduzido para as barragens abóbada do Baixo Sabor (Fig. 7), Foz Tua, Alto Tâmega, Fridão e Girabolhos (Fig. 8).

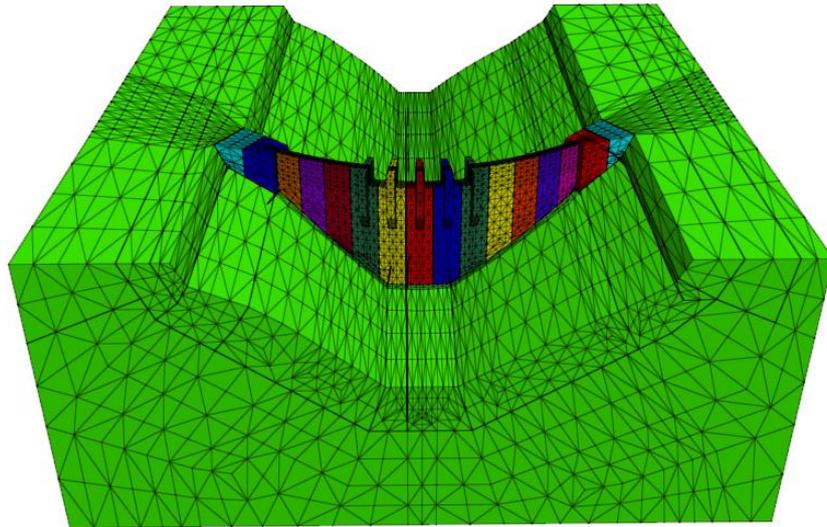


Figura 6. Modelo de elementos discretos para estudo do cenário de deslizamento pela superfície de fundação da barragem de Daivões.

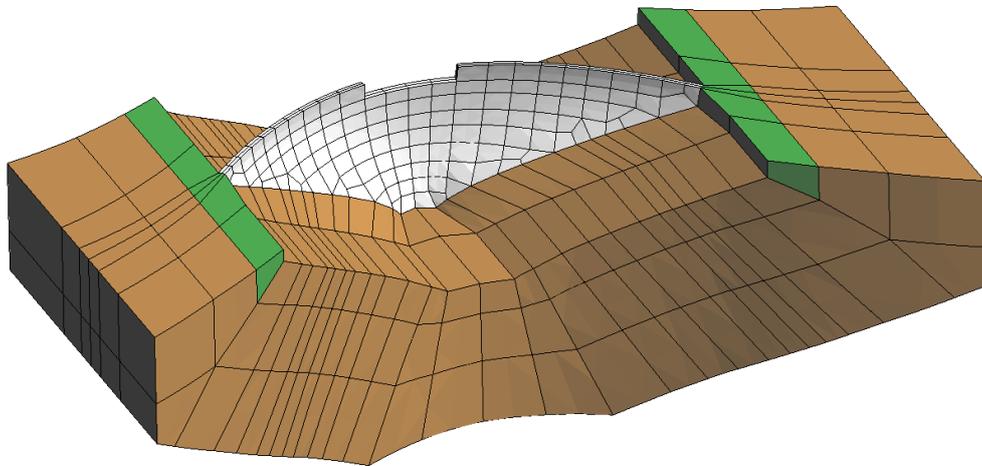


Figura 7. Modelo numérico para estudo do cenário de deterioração do betão da barragem de montante do Baixo Sabor.

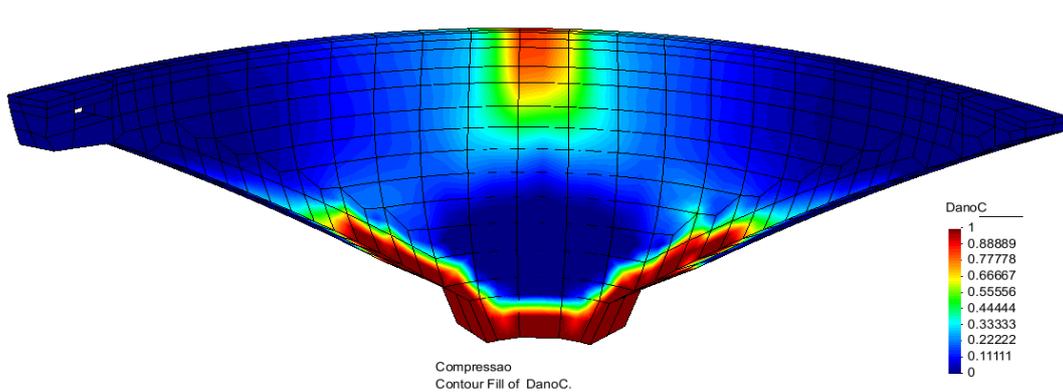


Figura 8. Estudo do cenário de deterioração do betão da barragem de Girabolhos. Isolinhas da variável de dano.

O comportamento das abóbadas, sob ações sísmicas, tem sido efetuado com base em modelos numéricos não lineares, que efetuam a análise dinâmica ao longo do tempo. Nestes modelos, adota-se uma representação da barragem em blocos, sendo representadas as juntas de contração da abóbada, assim como a superfície de fundação. Nestas discontinuidades admitiu-se comportamento não linear, com base num critério de Mohr-Coulomb. Os blocos da barragem e o maciço de fundação são considerados em regime elástico, sendo naturalmente verificada a admissibilidade das tensões máximas atingidas. Um elemento essencial nestas análises é a consideração da interação hidrodinâmica barragem-albufeira, simulada pelo método das massas associadas de Westergaard. Estes estudos sísmicos foram efetuados para as barragens abóbada já referidas. O modelo utilizado para o caso da barragem de Foz Tua, incluindo a representação das condições de fronteira dinâmicas tipo "free-field", é apresentado na Fig. 9.

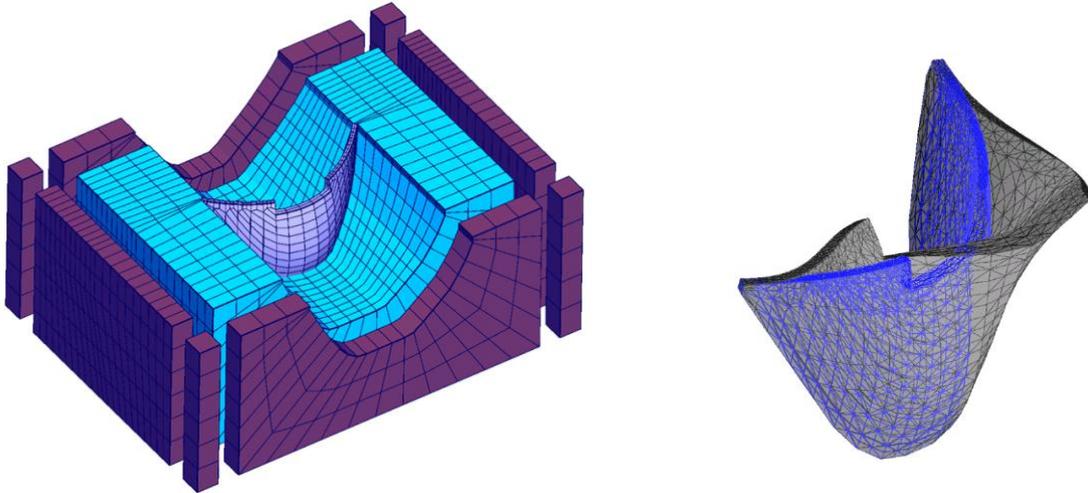


Figura 9. Modelo numérico para análise do comportamento sísmico da barragem de Foz Tua e primeiro modo de vibração da abóbada.

A avaliação da segurança das barragens para mecanismos de rotura através do maciço rochoso de fundação tem sido realizada com modelos de blocos discretos, em que se representam as principais discontinuidades detetadas durante os trabalhos de prospeção. Estas análises permitem identificar volumes de rocha suscetíveis de se destacar sob as ações transmitidas pela barragem, considerando também o efeito das pressões da água em todas as discontinuidades. Foram realizados estudos deste tipo para as barragens do Baixo Sabor, Alto Ceira (Fig. 10), Foz Tua, Alto Tâmega (Fig. 11), Fridão (Fig. 12) e Girabolhos.

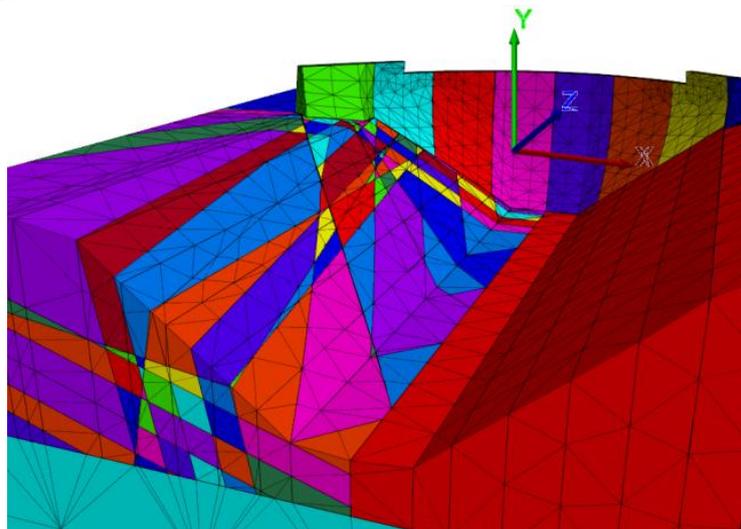


Figura 10. Modelo de elementos discretos para avaliação da segurança do encontro da margem direita da nova barragem do Alto Ceira.

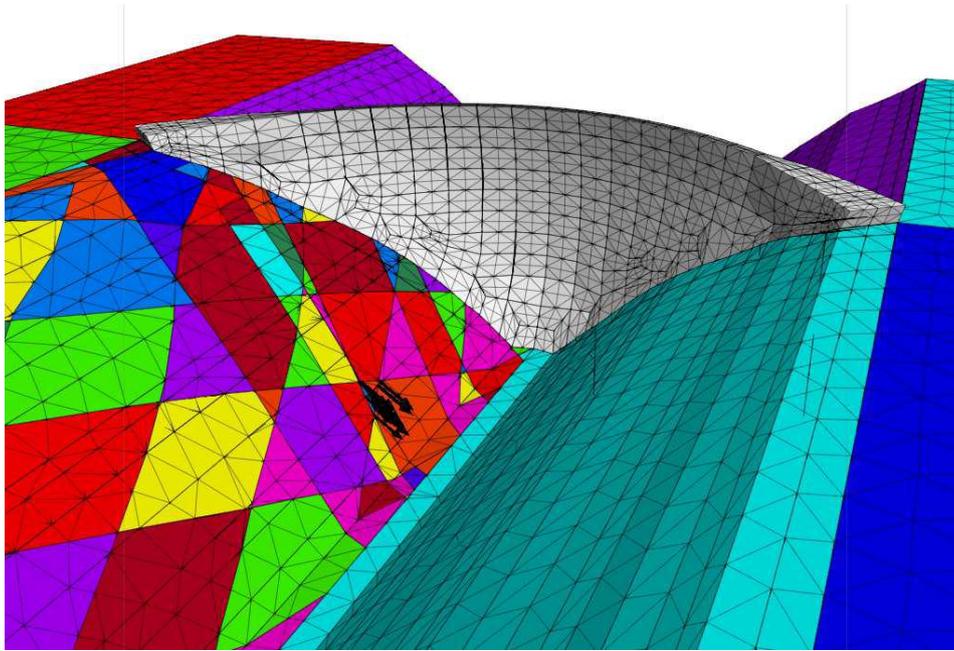


Figura 11. Modelo de elementos discretos para avaliação da segurança do maciço rochoso da margem direita da barragem do Alto Tâmega.

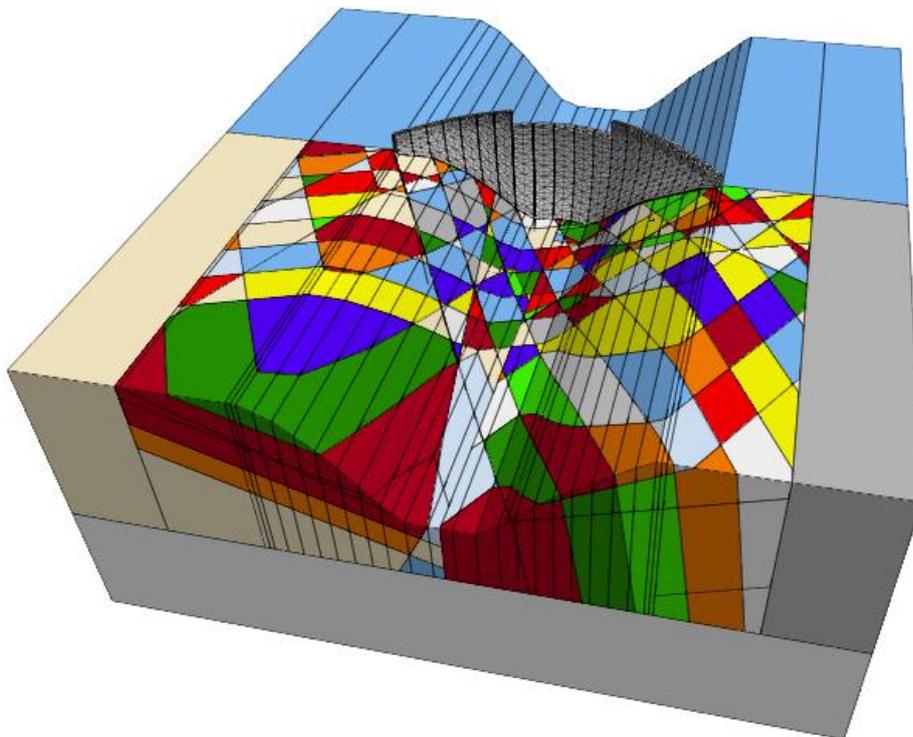


Figura 12. Modelo de elementos discretos para estudo de mecanismos de rotura através da fundação da barragem de montante de Fridão.

## **5. PLANOS DE OBSERVAÇÃO DAS BARRAGENS**

Os planos de observação das barragens do Alvito, Alto Tâmega, Daivões, Gouvães e Girabolhos foram elaborados pelo LNEC, a pedido dos concessionários, tendo em consideração as características das obras e a regulamentação portuguesa de segurança de barragens [1, 3]. Na definição dos planos houve uma interação significativa com os concessionários, nomeadamente no que respeitou às suas experiências específicas nos domínios da instrumentação, observação e controlo de segurança de obras similares.

Os planos de observação incluíram a definição dos sistemas de observação e dos critérios da sua exploração, bem como o planeamento genérico das visitas de inspeção, visando a avaliação das condições de segurança das obras durante as suas fases de vida, nomeadamente a construção, primeiro enchimento da albufeira e exploração. Referem os estudos específicos de caracterização das propriedades mecânicas dos materiais das barragens e suas fundações, bem como os meios utilizados na recolha, arquivo e tratamento dos resultados das observações, assim como a forma como a interpretação do comportamento estrutural e hidráulico das obras deverá ser feita com vista ao controlo da segurança.

Foi considerada a redundância na medição de deslocamentos absolutos e relativos das estruturas e das fundações, dada a sua importância na auscultação do comportamento das obras. Assim, os deslocamentos planimétricos das estruturas serão observados por meio de fios de prumo e por métodos geodésicos. Quanto aos deslocamentos relativos entre blocos, a medição de movimentos de abertura/fecho de juntas será realizada com medidores de juntas (dispositivos de resistência elétrica embebidos no betão) e através de dispositivos superficiais, a instalar nas galerias, que permitem monitorizar, para além dos referidos movimentos, os deslizamentos de direção montante-jusante e os verticais.

Nas barragens abóbada, para a medição direta de tensões considerou-se a instalação de um número reduzido de células tensométricas, dada a sua pequena fiabilidade. No entanto, as observações a efetuar nos grupos de extensómetros de resistência elétrica, associadas ao conhecimento das propriedades reológicas do betão que as células de fluência e os ensaios previstos deverão proporcionar, permitirão uma estimativa das tensões com aproximação suficiente.

No Quadro 3 apresenta-se, para cada uma das barragens, uma síntese das grandezas a observar e os tipos de dispositivos previstos para esse efeito [44 a 48].

Deve ainda referir-se que nas obras em construção: i) foi realizada a instalação experimental de dispositivos de fibra ótica na barragem do Alto Ceira; e ii) está em fase adiantada de estudo a utilização de sistemas do tipo GNSS nas duas barragens do Baixo Sabor.

Quadro 3. Tipo e número de dispositivos de observação considerados nas barragens

| Grandezas                                   | Método ou dispositivo                                     | Barragem / Tipo estrutural e altura |                   |                         |                    |                   |
|---|---|-------------------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|-------------------|
|   |   | Alvito                              | Alto Tâmega       | Daivões                 | Gouvães            | Girabolhos        |
|   |   | Gravidade de BCC, 89,00 m           | Abóbada, 106,50 m | Arco-gravidade, 77,50 m | Gravidade, 30,00 m | Abóbada, 105,50 m |
| Pressão hidrostática                        | Escalas de níveis e limnímetros                           | Sim                                 | Sim               | Sim                     | Sim                | Sim               |
| Subpressões na fundação                     | Piezómetros com tomada manométrica                        | 34                                  | 23                | 19                      | 10                 | 20                |
| Temperatura e humidade do ar e precipitação | Estação meteorológica (termómetro, higrómetro e udómetro) | Sim                                 | Sim               | Sim                     | Sim                | Sim               |
| Temperaturas do betão                       | Termómetros de resistência elétrica                       | 64                                  | 30                | 25                      | 12                 | 36                |
| Pressões da água no betão                   | Medidores de pressão                                      | 6                                   | -                 | -                       | -                  | -                 |
| Deslocamentos da estrutura                  | Fios de prumo diretos e invertidos                        | 3                                   | 5                 | 3                       | 2                  | 5                 |
|   | Geodesia (triangulação planimétrica)                      | 22                                  | 25                | 12                      | 13                 | 16                |
|   | Geodesia (nivelamento geométrico de precisão)             | 24                                  | 32                | 16                      | 17                 | 39                |
| Deslocamentos da fundação                   | Extensómetros de varas                                    | 14                                  | 11                | 10                      | 6                  | 20                |
| Movimentos de juntas                        | Medidores de movimentos de juntas de resistência elétrica | 35                                  | 77                | 43                      | -                  | 86                |
|   | Bases tridimensionais                                     | 65                                  | 45                | 40                      | 22                 | 55                |
| Extensões no betão                          | Extensómetros de resistência elétrica                     | 51                                  | 122               | 100                     | -                  | 132               |
| Tensões no betão                            | Células tensométricas                                     | -                                   | 6                 | -                       | -                  | 6                 |
| Deformabilidade do betão                    | Ensaio laboratoriais                                      | Sim                                 | Sim               | Sim                     | Sim                | Sim               |
|   | Células de fluência                                       | -                                   | 3                 | 3                       | -                  | 4                 |
| Acelerações dinâmicas                       | Acelerómetros triaxiais                                   | 4                                   | 7                 | 6                       | -                  | 7                 |
| Caudais drenados e infiltrados              | Drenos e bicas totalizadoras                              | 6 bicas                             | 10 bicas          | 8 bicas                 | 4 bicas            | 8 bicas           |
| Inspeções visuais                           | Rotina, especialidade e excecional                        | Sim                                 | Sim               | Sim                     | Sim                | Sim               |
| Análise das águas da albufeira e drenadas   | Análises físicas e químicas                               | Sim                                 | Sim               | Sim                     | Sim                | Sim               |

## 6. ENSAIOS EM MODELO FÍSICO DE ÓRGÃOS HIDRÁULICOS

A análise do comportamento do escoamento em estruturas hidráulicas, com base na modelação física, é uma técnica imprescindível no dimensionamento destas estruturas. Os estudos em modelo físico visam essencialmente analisar as condições de funcionamento hidráulico e caracterizar as ações hidrodinâmicas que se exercem sobre as fronteiras sólidas do escoamento em descarregadores de cheias, descargas de fundo, tomadas de água e circuitos hidráulicos. Na grande maioria dos casos, estes estudos em modelo físico permitem definir formas alternativas ao projeto com um melhor desempenho hidráulico ou, mantendo este desempenho, representando uma maior economia de construção.

Estão a ser conduzidos no LNEC vários estudos hidráulicos em modelo físico de aproveitamentos inseridos no PNBEPH, nomeadamente os relativos aos descarregadores dos aproveitamentos de Foz Tua (está também em fase de ensaio o circuito de produção de energia), Daivões e Alto Tâmega. Prevê-se a curto prazo o início do estudo em modelo reduzido dos descarregadores de Girabolhos e de Fridão (escalões de montante e jusante). Os estudos em modelo físico dos órgãos hidráulicos dos descarregadores das barragens do Alto Ceira, Baixo Sabor (escalões de montante e jusante) e Ribeiradio encontram-se concluídos (Fig. 13).



Figura 13. Modelos físicos de descarregadores em fase de ensaio no LNEC

As características dos descarregadores das barragens mencionadas encontram-se resumidas no Quadro 4, correspondendo a soluções de descarga muito diferentes.

Quadro 4. Características gerais dos descarregadores ensaiados no LNEC

| <i>Barragem</i>                       | <i>Tipo descarga e solução de dissipação</i>         | <i>Tipo de soleira</i>           | <i>Caudal de projeto (m<sup>3</sup>/s)</i> |
|---------------------------------------|--|----------------------------------|--|
| Alto Ceira                            | Lâmina livre e 3 bacias (no talvegue e nas encostas) | Frontal com 7 vãos sem comportas | 200  |
| Baixo Sabor (montante)                | Lâmina livre e bacia de impacto                      | Frontal com 4 comportas          | 5000                                       |
| Baixo Sabor (jusante)                 | Lâmina guiada e “roller bucket”                      | Frontal com 4 comportas          | 5000                                       |
| Ribeiradio                            | Lâmina guiada e concha de rolo com blocos            | Frontal com 3 comportas          | 2750                                       |
| Foz Tua                               | Lâmina livre e bacia de impacto                      | Frontal com 4 comportas          | 5500                                       |
| Fridão (montante)                     | Lâmina livre e bacia de impacto                      | Frontal com 4 comportas          | 4000                                       |
| Fridão (jusante)                      | Lâmina guiada e bacia de dissipação                  | Frontal com 4 comportas          | 4100                                       |
| Alto Tâmega (descarregador principal) | Galeria na margem esquerda e salto de esqui          | Frontal com 3 comportas          | 1510                                       |
| Daivões                               | Lâmina guiada e bacia de dissipação                  | Frontal com 4 comportas          | 2944                                       |
| Girabolhos                            | Canal na margem direita e salto de esqui             | Lateral não controlado           | 1166                                       |

Os estudos foram conduzidos em função da especificidade de cada uma das soluções testadas, mas consideraram, de uma forma geral, os seguintes aspetos:

- análise das condições de chegada e do escoamento sobre soleiras descarregadoras, bem como melhoria da capacidade de vazão por eliminação de eventuais contrações introduzidas por pilares e muros-guia;
- determinação do campo de pressões em soleiras descarregadoras;
- determinação de curvas de vazão (com abertura total e, eventualmente, parcial das comportas) e definição da lei de abertura das mesmas;
- caracterização do campo de pressões (médias e flutuações) nas fronteiras sólidas com o escoamento, nomeadamente em bacias de impacto;
- determinação do alcance de jatos descarregados;
- análise do funcionamento e melhoria da eficiência de soluções de dissipação de energia (bacias dissipação por ressalto hidráulico ou de impacto, saltos de esqui e conchas por rolos);
- estudo das erosões a jusante e medições de velocidades na restituição de caudais.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A construção, em curso e no curto prazo, de um conjunto de barragens de betão, constitui um desafio importante para a engenharia portuguesa, quer pelo número e dimensão das obras, quer pela necessidade de recorrer a tecnologias adequadas para satisfazer os requisitos de segurança, ambientais e económicos. O LNEC teve um envolvimento significativo nos estudos de apoio ao projeto, nas suas diversas vertentes, desde a prospeção dos locais de implantação até à modelação dos comportamentos estruturais, geotécnicos e hidráulicos, bem como na definição ou revisão de planos de observação. O apoio do LNEC prosseguirá durante a construção e exploração destas obras, tanto nas atividades que decorrem das suas obrigações legais no âmbito do cumprimento do Regulamento de Segurança de Barragens [1], como em aspetos relacionados com o comportamento estrutural e hidráulico das obras e suas fundações, que naturalmente continuarão a suscitar questões que motivam a investigação e o desenvolvimento tecnológico.

Dos estudos referidos na presente comunicação devem salientar-se as capacidades do LNEC: i) na modelação do comportamento estático e dinâmico das estruturas, para cenários correntes e de rotura, considerando comportamentos não-lineares em volumes e superfícies de descontinuidade, utilizando ferramentas numéricas desenvolvidas na própria instituição ou com um contributo significativo desta; ii) no estudo de escoamentos em estruturas hidráulicas, visando a avaliação do comportamento destes sistemas e a definição de formas alternativas com melhor desempenho; e iii) no planeamento das atividades de observação e de controlo da segurança das obras, incluindo a definição dos sistemas de monitorização associados.

Estão em estado avançado de construção as barragens do Alto Ceira (Fig. 14), Baixo Sabor montante (Fig. 15) e Baixo Sabor jusante (Fig. 16). Nas barragens de Ribeiradio e Ermida começaram, nos últimos meses, as betonagens do corpo das obras, e na barragem de Foz Tua está-se na fase de escavações. Como complemento e no seguimento dos estudos atrás descritos, o LNEC tem estado envolvido no acompanhamento da construção destas obras, designadamente nas vertentes relacionadas com a instrumentação e o controlo da segurança, mobilizando, em muitas delas, equipas com afetação permanente aos trabalhos.



Figura 14. Vista geral das obras de construção da nova barragem do Alto Ceira, em setembro de 2012.



Figura 15. Vista geral das obras de construção da barragem de montante do Baixo Sabor, em setembro de 2012.



Figura 16. Vista geral das obras de construção da barragem de jusante do Baixo Sabor, em setembro de 2012.

## **8. AGRADECIMENTOS**

Agradece-se às empresas EDP – Energias de Portugal, Iberdrola e Endesa a autorização concedida para publicação dos elementos apresentados na presente comunicação.

## **9. REFERÊNCIAS**

- [1] RSB (2007). Regulamento de segurança de barragens. Decreto-Lei nº 344/2007.
- [2] NPB (1993). Normas de projecto de barragens. Anexo à Portaria nº 846/93.
- [3] NOIB (1993). Normas de observação e inspeção de barragens. Anexo à Portaria nº 847/93.
- [4] LNEC (2010). Aproveitamento hidroeléctrico de Daivões – Barragem: Ensaios com macacos planos de grande área (LFJ) nas galerias GBAD175D e GBAD180E. Rel. 429/2010 – NFOS.
- [5] LNEC (2010). Aproveitamento hidroeléctrico de Daivões – Barragem - Ensaios com macacos planos de grande área (LFJ) nas galerias GBAD195D, GBAD205E e GBAD221E. Rel. 163/2010 – NFOS.
- [6] LNEC (2009). Aproveitamento hidroeléctrico de Daivões - Barragem – Ensaios dilatométricos. Rel. 370/2009 – NFOS.
- [7] LNEC (2010). Barragem de Gouvães - Determinação dos parâmetros de resistência e deformabilidade de diaclases. Rel. 450/2010 – NFOS.
- [8] LNEC (2010) Aproveitamento hidroeléctrico do Alto Tâmega – Barragem: Ensaios com macacos planos de grande área (LFJ) na margem direita. Rel. 441/2010 – NFOS.
- [9] LNEC (2011). Aproveitamento hidroeléctrico da Alto Tâmega - Ensaios geomecânicos realizados pelo LNEC. Rel. 219/2011 – NFOS.
- [10] LNEC (2009). Aproveitamento hidroeléctrico de Fridão - Barragem de jusante: ensaios dilatométricos. Rel. 262/2009 – NFOS.
- [11] LNEC (1989). Estudo das fundações da barragem do Fridão. Rel. 135/1989 – NFR.
- [12] LNEC (2010). Aproveitamento hidroeléctrico de Foz Tua - Reconhecimento geológico-geotécnico. Caracterização geomecânica. Rel. 196/2010 – NFOS.
- [13] LNEC (2009). Ensaios de mecânica das rochas para a barragem de Ribeiradio. Rel. 183/2009 – NFOS.

- [14] LNEC (2010). Aproveitamento hidroeléctrico do Alvito - Ensaios in situ de caracterização geomecânica dos maciços rochosos da fundação da barragem e do circuito hidráulico. Rel. 380/2010 – NFOS.
- [15] LNEC (2010). Aproveitamento hidroeléctrico do Alvito - Ensaios laboratoriais de caracterização geomecânica dos maciços rochosos da fundação da barragem e do circuito hidráulico. Rel. 381/2010 – NFOS.
- [16] LNEC (2005). Barragem de Baixo Sabor – Ensaios LFJ. Rel. 104/2005 – NFOS.
- [17] LNEC (2005) Barragem de Baixo Sabor – Ensaios STT. Rel. 349/2005 – NFOS.
- [18] LNEC (2004). Ensaios de caracterização geomecânica para o aproveitamento do Baixo Sabor – Escalão principal. Rel. 416/2004 – NFOS.
- [19] LNEC (2004). Barragem do Baixo Sabor. Ensaios laboratoriais para a caracterização do maciço de fundação. Rel. 238/2004 – NFOS.
- [20] LNEC (2005). Ensaios de caracterização geomecânica para o aproveitamento do Baixo Sabor – Contra-embalse. Rel. 142/2005 – NFOS.
- [21] [1] LNEC (2004) Barragem do Feiticeiro. Ensaios laboratoriais para a caracterização do maciço de fundação. Rel. 289/2004 – NFOS.
- [22] LNEC (1992). Trabalhos de prospecção na fundação da nova barragem do Alto Ceira. Rel. 195/1992 – NOS/NP.
- [23] LNEC (2009). Barragem de Ribeiradio. Estudo com base num modelo tridimensional de elementos finitos. Cenários correntes e de rotura. Segunda definição de formas. Rel. 307/2009 – NMMF.
- [24] LNEC (2008). Análise do cenário de rotura de deslizamento no contacto barragem-fundação do escalão de jusante do aproveitamento hidroeléctrico do Baixo Sabor. Rel. 254/2008 – NMMF.
- [25] LNEC (2011). Análise do comportamento dinâmico da barragem de Alvito para o sismo máximo de projecto. Rel. 27/2011 – NMMF.
- [26] LNEC (2011). Estudo de cenários de rotura pela fundação da barragem de Daivões. Rel. 117/2011 – NMMF.
- [27] LNEC (2005). Análise do comportamento até à rotura da barragem do Baixo Sabor para o cenário de deterioração do betão. Rel. 289/2005 – NMMF.
- [28] LNEC (2010). Análise do comportamento até à rotura da barragem de Foz Tua para o cenário de deterioração do betão. Rel. 190/2010 – NMMF.
- [29] LNEC (2010). Barragem do Alto Tâmega. Análise do comportamento até à rotura para o cenário de deterioração do betão. Rel. 356/2010 – NMMF.
- [30] LNEC (2011). Barragem principal do Aproveitamento Hidroeléctrico do Fridão. Análise do comportamento até à rotura para o cenário de deterioração do betão. Rel. 139/2011 – NMMF.
- [31] LNEC (2011). Barragem de Girabolhos. Análise do comportamento até à rotura para o cenário de deterioração do betão. Rel. 179/2011 – NMMF.
- [32] LNEC (2005). Análise do comportamento dinâmico da barragem do Baixo Sabor para o sismo máximo de projecto. Rel. 409/2005 – NMMF.
- [33] LNEC (2010). Análise do comportamento dinâmico da barragem de Foz Tua para o sismo máximo de projecto. Rel. 189/2010 – NMMF.
- [34] LNEC (2010). Análise do comportamento dinâmico da barragem do Alto Tâmega para o sismo máximo de projecto. Rel. 385/2010 – NMMF.
- [35] LNEC (2011). Análise do comportamento dinâmico da barragem principal do Aproveitamento Hidroeléctrico do Fridão para o sismo máximo de projecto. Rel. 140/2011 – NMMF.

- [36] LNEC (2011). Análise do comportamento dinâmico da barragem de Girabolhos para o sismo máximo de projecto. Rel. 398/2011 – NMMF.
- [37] LNEC (2005). Estudo de cenários de rotura pela fundação da barragem do Baixo Sabor. Rel. 408/2005 – DBB/NMMF.
- [38] LNEC (2008). Estudo de cenários de rotura pela fundação da nova barragem do Alto Ceira. Rel. 174/2008 – NMMF.
- [39] LNEC (2011). Estudo complementar dos cenários de rotura pela fundação da nova barragem do Alto Ceira. Rel. 423/2011 – NMMF.
- [40] LNEC (2010). Estudo de cenários de rotura pela fundação da barragem de Foz Tua. Rel. 211/2010 – NMMF.
- [41] LNEC (2010). Estudo de cenários de rotura pela fundação da barragem do Alto Tâmega. Rel. 421/2010 – NMMF/NFOS/NO.
- [42] LNEC – Estudo de cenários de rotura pela fundação da barragem principal do Aproveitamento Hidroeléctrico de Fridão. Rel. 156/2011 – NMMF/NO.
- [43] LNEC (2011). Estudo de cenários de rotura pela fundação da barragem de Girabolhos. Rel. 436/2011 – NMMF/NO.
- [44] LNEC (2010). Plano de observação da barragem do Alvito. Rel. 428/2010 – NO.
- [45] LNEC (2011). Barragem do Alto Tâmega. Planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira. Rel. 52/2011 – NO.
- [46] LNEC (2011). Barragem de Daivões. Planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira. Rel. 53/2011 – NO.
- [47] LNEC (2011). Barragem de Gouvães. Planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira. Rel. 54/2011 – NO.
- [48] LNEC (2011). Barragem de Girabolhos. Planos de observação e de primeiro enchimento da albufeira. Rel. 201/2011 – NO.