

Artigo REF: 49A017

## **OBSERVAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS E DE PONTES. CRITÉRIOS E MÉTODOS**

**João Marcelino<sup>(\*)</sup>, José Mora Ramos e Luís Oliveira Santos**

Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia, Lisboa, Portugal

<sup>(\*)</sup>*Email:* marcelino@lnec.pt

### **RESUMO**

Apresenta-se neste trabalho uma perspectiva da prática moderna da observação do comportamento estrutural de barragens e de pontes, base do controlo da sua segurança, salientando os critérios e os métodos em que se baseia e tendo por referência a experiência portuguesa, particularmente a actividade desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Referem-se os aspectos comuns à observação dos dois tipos de estruturas, bem como as particularidades de cada tipo, dando relevo aos sistemas de observação, aos modelos de comportamento que estabelecem o tipo de correlações a ser verificadas entre as variáveis de controlo representativas das acções, das propriedades estruturais e das respostas das estruturas e ainda ao controlo de segurança em tempo real.

### **INTRODUÇÃO**

O aproveitamento dos recursos hídricos e a circulação de pessoas e de bens são da maior importância para o desenvolvimento social e económico mas, dada a complexidade da vida moderna, podem obrigar hoje a intervenções significativas no ambiente em que se integram, influenciando-o e transformando-o enormemente. A dimensão dessas intervenções varia com os objectivos a atingir e com a natureza de cada projecto, podendo, em muitos casos, exigir a construção de grandes obras. Na realidade, por exemplo, uma grande barragem e a sua albufeira, ou uma grande ponte, “criam” um novo ambiente e determinam novas formas de economia e, muitas vezes, de vida, que importa preservar<sup>1</sup>. Introduzem, paralelamente, nesse ambiente modificado, um risco potencial por vezes muito grande, que obriga a que essas obras sejam objecto de um controlo de segurança permanente e rigoroso.

As intervenções do homem no ambiente são feitas em ciclos sucessivos (Figura 1), o primeiro dos quais se inicia pela observação do ambiente natural, ou alterado por intervenções anteriores (Pedro, J. O., 1999), prossegue com o estabelecimento de modelos que viabilizam a fase seguinte, o projecto de intervenção, e termina com a intervenção propriamente dita, a construção. Concluída esta inicia-se um novo ciclo com a observação do ambiente alterado, em que se incluem, obviamente, as inspecções e estudos de comportamento das obras que o alteraram, o qual prossegue com o estabelecimento de novos modelos e de eventuais obras de correcção se necessárias, e assim sucessivamente.

---

<sup>1</sup> De salientar, entre muitos outros aspectos, por exemplo, a actividade de pesca que um grande lago artificial por vezes viabiliza, como é o caso da albufeira da barragem de Cahora-Bassa.

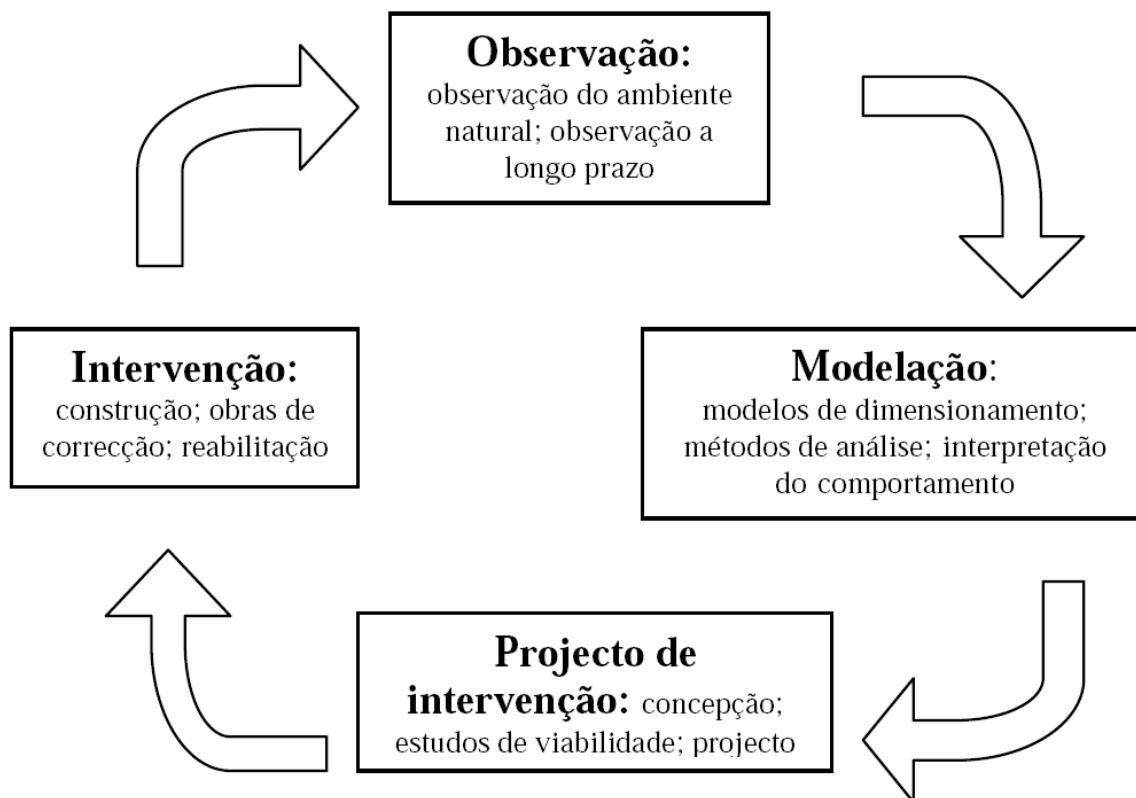


Figura 1 – Ciclos de intervenção no ambiente (Arantes, E. R., Pedro, J. O., 1993)

Barragens e pontes, designadamente quando de grande dimensão, são estruturas complexas, onerosas, que exigem, quer no seu projecto e construção, quer na sua exploração, um conjunto de conhecimentos e práticas específicos, determinantes para o controlo da sua segurança e para a garantia da sua durabilidade. Controlo de segurança que visa aspectos estruturais hidráulicos, operacionais e ambientais.

O controlo de segurança estrutural inicia-se na fase de projecto e desenvolve-se, posteriormente, essencialmente com base nas actividades de observação (Mora Ramos, J., 2004). Por observação entende-se o conjunto de actividades relativas ao planeamento, instalação, manutenção e exploração dos sistemas dedicados a essa tarefa, à caracterização das propriedades reológicas, térmicas e hidráulicas dos materiais constitutivos das estruturas construídas, à realização de inspecções visuais e à análise e interpretação de toda a informação recolhida.

Os sistemas de observação são planificados tendo em conta as indicações do projecto, a experiência com o comportamento conhecido de estruturas semelhantes e as informações complementares sobre o comportamento das obras que as entidades responsáveis pelo controlo da segurança considerem necessárias.

Na interpretação do comportamento desempenha hoje papel de relevo a modelação do comportamento estrutural. Na prática, procede-se à verificação da funcionalidade das estruturas (e só em casos particulares à consideração de cenários de rotura) interpretando o comportamento observado, no sentido da procura de eventuais anomalias, usando de forma integrada modelos de recorte estatístico e modelos numéricos, estes em regra pelo método dos elementos finitos (ou equivalente). A utilização integrada dos dois tipos de modelos potencia as suas capacidades específicas, ao considerar em simultâneo os resultados da observação com recurso a técnicas que deles fazem uso directo e global, sem, no entanto, recorrerem às

leis da mecânica, com resultados de modelos numéricos que se baseiam nestas leis. Trata-se, por um lado, de “calibrar” os modelos numéricos com os resultados da observação e, por outro, de verificar as análises de recorte estatístico com resultados de modelos que avaliam, de acordo com as leis da mecânica, a consistência física destas análises.

Neste trabalho, para além da apresentação circunstanciada dos conceitos acabados de referir, aborda-se ainda um dos domínios em que ultimamente têm sido feitos esforços de maior significado: o da automatização de todo o processo de controlo, desde a recolha dos dados da observação das estruturas, sua transmissão e análise, até à própria interpretação do comportamento, de forma a viabilizar o controlo de segurança em tempo real.

O tratamento automático dos dados da observação de barragens e de pontes processa-se desde há muito tempo, através de programas desenvolvidos especificamente para o efeito, muitos dos quais incluem rotinas para a validação automática dos dados e dos resultados.

O estabelecimento de limites de validação para os resultados, isto é, por exemplo no caso das barragens, valores dos deslocamentos horizontais e verticais, deslocamentos relativos, caudais, subpressões e extensões, é feito de forma diferenciada consoante a grandeza em causa e o tipo de modelos de previsão disponíveis. Uma vez estabelecido que determinada grandeza ultrapassou os valores limite estipulados pelos modelos de previsão, deverá ser analisada a causa deste desvio. Este estudo requer em princípio a intervenção directa de especialistas tendo, no entanto, sido desenvolvidos, recentemente, alguns sistemas de apoio à decisão, de que é exemplo o sistema SISAS (Portela, E. A., 2001), desenvolvido no LNEC, com apoio do Instituto Superior Técnico de Lisboa, para barragens de betão, que não dispensando aquela intervenção, automatiza parte da análise.

No caso de barragens em aterro, muitas vezes, os limites de validação dos resultados só podem ser conhecidos com rigor no decurso das actividades de observação, uma vez que os modelos de comportamento são bastante complexos por lidarem com materiais multifásicos e naturais. Neste contexto, a automatização das medições é muito importante por potenciar a calibração dos modelos de comportamento baseados em observações.

No caso das pontes os benefícios resultantes da automatização das medições, associadas ao desenvolvimento tecnológico verificado ao nível dos sensores e dos sistemas de comunicação, alteraram profundamente a forma de instrumentar as obras de arte. Com efeito, o equipamento disponível possibilitando, para além da realização e armazenamento das medições, o seu tratamento com possibilidade de desencadear situações rotinas de alarme, trouxe para a actualidade o desenvolvimento dos sistemas que concretizem o adequado tratamento da informação recolhida de forma automática, explorando de forma mais completa as potencialidades dos equipamentos existentes (Marecos *et al*, 2006; Marecos, 2007).

## **PLANIFICAÇÃO DA OBSERVAÇÃO. SISTEMAS DE OBSERVAÇÃO**

### **Aspectos gerais. Plano de Observação**

A observação das grandes estruturas é, desde há décadas, uma actividade planificada (Rocha, M., *et al*, 1956). Esta planificação é, frequentemente, objecto de um documento específico, designado por *Plano de Observação*.

Elaborado, em princípio, antes do início da construção<sup>2</sup>, o plano de observação sofre, em regra, alterações ao longo desta e, por vezes, após a entrada das obras em exploração. Deve

---

<sup>2</sup> O projecto inclui, frequentemente, o Plano de Observação, ou um ante-plano, onde o projectista define, na sua perspectiva, quais os aspectos mais sensíveis da obra, a que a observação deverá então, obrigatoriamente, atender.

atender às hipóteses e aos aspectos críticos do projecto, ter em conta a avaliação dos riscos potenciais e definir meios que permitam o controlo ao longo do tempo das condições de segurança e funcionalidade das obras e a detecção atempada de quaisquer fenómenos anómalos<sup>3</sup>.

O plano de observação é estabelecido para toda a vida da obra<sup>4</sup> devendo, no entanto, ser entendido como dinâmico e ser revisto, se necessário. Pela importância que têm para a funcionalidade e segurança são também definidos planos de entrada em serviço (primeiro enchimento no caso das barragens e ensaios de carga nas pontes), os quais devem ser articulados com o plano de observação.

A partir do comportamento observado durante a fase de entrada em serviço deverá ser estabelecido um primeiro quadro de referência relativo ao comportamento normal da estrutura, o qual se poderá afastar daquele que foi previsto em fase de projecto. De facto, particularmente no caso das barragens, em especial de aterro, é comum haver diferenças significativas<sup>5</sup> entre o projecto e a obra construída, sendo que é o comportamento desta que importa caracterizar e não o definido no projecto.

Após a entrada em serviço a obra entra em exploração, sendo, a menos da ocorrência de anomalias importantes não detectadas durante nesta fase, reapreciado o seu comportamento no fim do primeiro período desta fase, cuja duração habitual é de cerca de cinco anos. É, então, estabelecido um novo quadro de comportamento normal, que considera a resposta da estrutura a cargas permanentes e repetidas e que é, assim, referência para a observação a longo prazo.

### **Sistemas de instrumentação. Variáveis de controlo**

Uma peça fundamental do Plano de Observação é a relativa à definição dos sistemas de instrumentação que ao longo da vida da obra permitirão a medição das variáveis

---

<sup>3</sup> Assim, deve o Plano de Observação atender, entre outros, aos seguintes requisitos:

- estabelecer regras gerais a observar em termos de segurança ao longo da vida da obra, a considerar nos planos e programas de observação de períodos específicos a elaborar posteriormente;
- definir a forma como deverá ser registado o processo construtivo, com vista à recolha de elementos respeitantes a todos os fenómenos que, por qualquer forma, condicionem o comportamento futuro da obra;
- definir a forma como durante a construção e, posteriormente, ao longo da vida da obra, deverá ser complementado o conhecimento das características reológicas, térmicas e hidráulicas dos materiais e da sua evolução;
- definir os sistemas de instrumentação a instalar no corpo das estruturas, nas suas fundações, nos maciços rochosos envolventes e, no caso das barragens, eventualmente, ao longo das margens da albufeira;
- definir quais os estudos a efectuar para caracterização, se necessário, do comportamento dinâmico das estruturas, nomeadamente ensaios de vibração forçada;
- definir o tipo e periodicidade dos ensaios de natureza físico-química a realizar para caracterização das acções de natureza química e da alteração dos materiais;
- definir a forma e a periodicidade da recolha, tratamento, validação, transmissão e análise dos dados das observações ao longo da vida da obra;
- indicar quais os modelos que se considera adequado utilizar para apoio à interpretação do comportamento observado nas várias fases de vida da obra;
- definir a periodicidade mínima das inspecções visuais a efectuar, indicando quais serão obrigatoriamente participadas pela Autoridade, referindo quais os aspectos mais sensíveis a que deverão atender.

<sup>4</sup> A vida da obra é o período que decorre desde a sua construção até à eventual demolição e inclui as fases de construção, entrada em serviço (ensaio de carga, primeiro enchimento), exploração, subdividida no primeiro período de exploração e período de exploração normal, abandono e demolição.

<sup>5</sup> Estas diferenças decorrem muitas vezes da dificuldade de caracterização rigorosa das propriedades do maciço de fundação. Na realidade, mesmo em casos em que estes trabalhos foram bem planificados e executados, ocorrem “surpresas” quando se tem acesso à fundação.

representativas das acções, das propriedades estruturais e das respostas estruturais, designadas por variáveis de controlo (Pedro, J. O., 2000).

A caracterização destas variáveis envolve:

- em relação às acções: medições relativas ao peso próprio, temperatura do ar e da água, pressões da água, sobrecargas, acções químicas, sismicidade, etc.;
- em relação às propriedades estruturais: medições relativas à geometria das obras e às propriedades mecânicas, térmicas, químicas e hidráulicas dos materiais do corpo da estrutura e das fundações;
- em relação às respostas estruturais: medições relativas aos efeitos directos das acções, isto é, pressão da água nos poros, fendas e fracturas, temperaturas nos materiais, etc. e medições relativas aos efeitos estruturais, ou seja, deslocamentos, movimentos de juntas, deformações, tensões, caudais, etc.

É através de correlações de diverso tipo, estabelecidas entre as variáveis de controlo através de modelos<sup>6</sup>, que será feita a interpretação do comportamento estrutural observado e, conseqüentemente, o controlo da segurança e da funcionalidade.

Os modelos utilizados na interpretação do comportamento envolvem idealizações da estrutura, dos materiais e das acções e podem ser sempre traduzidos em linguagem matemática. A sua análise pode ser feita por (Oliveira, S. B., 2000):

- métodos analíticos (modelos analíticos) quando, em casos muito simples, é possível resolver analiticamente as equações fundamentais da Mecânica;
- métodos experimentais (modelos experimentais), utilizados em situações muito complexas, designadamente devido à forma da resposta dos materiais a determinadas acções;
- métodos numéricos (modelos numéricos) com os quais é possível resolver, para casos complexos, as equações fundamentais da Mecânica de forma aproximada;
- métodos semi-empíricos (modelos semi-empíricos) que estabelecem aquelas correlações de forma muito simplificada, sem recorrer às equações da mecânica e que incorporam na análise resultados da observação.

Determinados métodos (modelos) semi-empíricos, designadamente os chamados métodos (modelos) de análise quantitativa, são muito utilizados na observação de barragens de betão.

A forma como são estabelecidas as correlações entre as variáveis de controlo, isto é, como são utilizados os modelos, depende dos dados de partida e dos objectivos da análise.

Na perspectiva do dimensionamento (projecto) os dados do problema são as acções e as características estruturais e os resultados as respostas das estruturas.

Na perspectiva da observação os dados do problema podem ser as acções e as respostas, obtendo-se como resultados as características estruturais, ou podem ser as acções, as formas da estrutura e as respostas, sendo os resultados as propriedades dos materiais, ou podem ainda ser as acções, as propriedades dos materiais e as respostas, sendo os resultados, neste caso, as formas e ligações da estrutura (Quadro 1).

---

<sup>6</sup> Um modelo é uma representação simplificada da realidade, que se baseia num determinado conceito. Um modelo pode ser extremamente simples, por exemplo, traduzindo apenas uma relação causa efeito entre uma acção e uma resposta: por exemplo numa barragem, a uma subida do nível de montante deverá corresponder um aumento dos caudais drenados.

Na fase de projecto avaliam-se, com o apoio dos modelos de dimensionamento, as condições de funcionalidade e de segurança da estrutura, para cenários correspondentes a situações de acidente e cenários relativos às situações previsíveis de exploração mais desfavoráveis. Nas fases seguintes de vida da obra, sempre que considerado necessário, reavaliam-se, agora para a obra efectivamente construída, as condições de segurança e funcionalidade, para os mesmos cenários, ou para outros que o comportamento observado da obra venha a aconselhar.

QUADRO 1 – Perspectivas do projecto e da observação

<b>Perspectiva</b>	<b>Dados</b>	<b>Resultados</b>
<b>Dimensionamento (projecto)</b>	Acções Características estruturais	Respostas estruturais
	Acções Respostas	Características estruturais
<b>Observação</b>	Acções Propriedades dos materiais Respostas	Formas e ligações da estrutura
	Acções Formas da estrutura Respostas	Propriedades dos materiais

### **Definição das variáveis de controlo**

O conhecimento dos critérios de projecto, dos cenários de acidente e incidente<sup>7</sup> mais prováveis para cada tipo de obra, bem como das deteriorações mais comuns, permite, associando a cada cenário as variáveis que afecta, a definição de variáveis de controlo, cujo conhecimento viabiliza, em princípio, a detecção precoce e o acompanhamento da eventual evolução desse cenário.

A medição das variáveis de controlo, uma vez definidas, ou de grandezas associadas, é feita através de equipamentos específicos, permanentemente instalados nas estruturas e de leitura frequente ou praticamente contínua, ou não instalados e usados em campanhas de medição realizadas em épocas seleccionadas.

Estes equipamentos constituem-se em sistemas de instrumentação relativos a cada variável, por vezes interligados, e permitem, se distribuídos nas obras de forma adequada, a correcta interpretação do comportamento estrutural. Para tanto, é necessário verificar se a definição das variáveis de controlo feita a partir das situações limite correspondentes aos cenários de acidente e incidente mais prováveis é suficiente para a interpretação do comportamento ou se para tal é necessária informação complementar.

Salienta-se que tendo a observação, por fim último, evitar que se atinjam estados limite últimos e de utilização, se exige dela a detecção precoce de deteriorações cuja ocorrência e evolução não controlada possam vir a originar estes estados limite.

<sup>7</sup> Cenários são situações que devem ser encaradas para a avaliação da fiabilidade das estruturas e que, conforme correspondam a estados limite de utilização ou últimos, se designam por cenários correntes ou de utilização, ou por cenários de risco ou de rotura. Aos primeiros correspondem incidentes, aos segundos acidentes.

Salienta-se também que, da mesma forma que no projecto de uma estrutura, na planificação dos sistemas de instrumentação a generalização de critérios é sempre difícil devendo, então, as propostas seguintes, relativas a três tipos de obras, ser criteriosamente adaptadas caso a caso.

A caracterização das principais acções é determinante para a interpretação do comportamento de todas as obras. Da mesma forma, esta interpretação requer o conhecimento em bases mínimas das deformabilidades e das permeabilidades dos materiais, enquanto a avaliação da segurança para diversos cenários de rotura requer o conhecimento das resistências.

Apresentam-se seguidamente critérios de definição de variáveis de controlo para três tipos de obra: barragens de betão do tipo abóbada, barragens de aterro zonadas e pontes de betão armado pré-esforçado.

### Barragens de betão do tipo abóbada

Uma barragem abóbada (ou arco) (Figura 2) é uma estrutura em alvenaria ou em betão, com curvatura em planta, com a convexidade voltada para montante, concebida de forma a transmitir o impulso da água principalmente para os encontros e não para o fundo do vale, utilizando para tanto a resistência à compressão do material de que é feita. Na figura 3 representa-se de forma esquemática a maneira como o impulso da água é transmitido para a fundação na zona dos rins da estrutura e apresenta-se um diagrama de tensões principais devidas à pressão hidrostática na barragem de Vilarinho da Furnas, uma barragem do tipo abóbada delgada, com cerca de 100 m de altura, construída no norte de Portugal.

As principais acções a ter em conta no dimensionamento de uma abóbada, essencialmente as mesmas que para os outros tipos de barragens de betão, são o peso próprio, as acções da água e as variações de temperatura<sup>8</sup>. O efeito destas acções, particularmente das acções térmicas é, no entanto, muito diferente, nos diferentes tipos de estruturas.

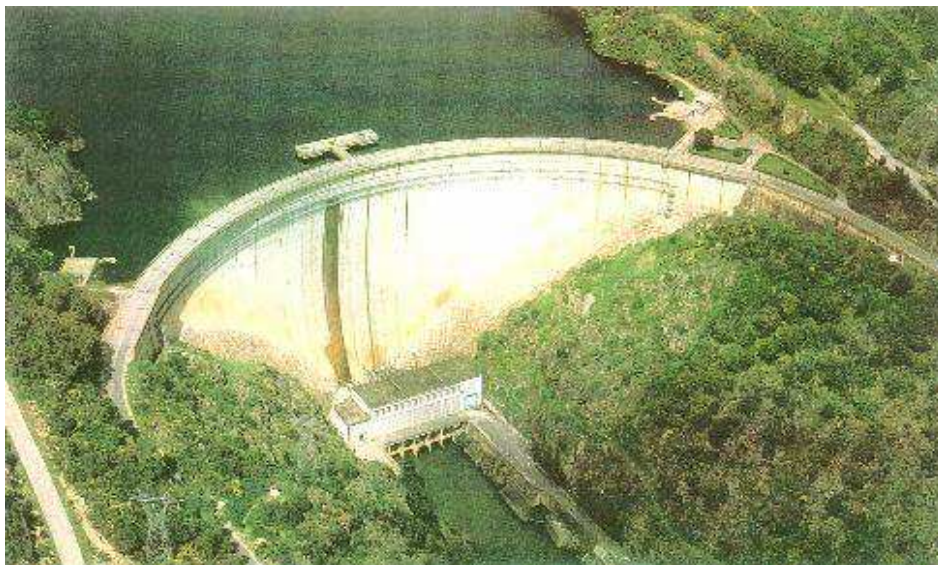


Figura 2 - Barragem do Cabril, no rio Zêzere, em Portugal

---

<sup>8</sup> As acções sísmicas não são em regra consideradas na definição inicial das formas, sendo no entanto feitas posteriormente as necessárias verificações.

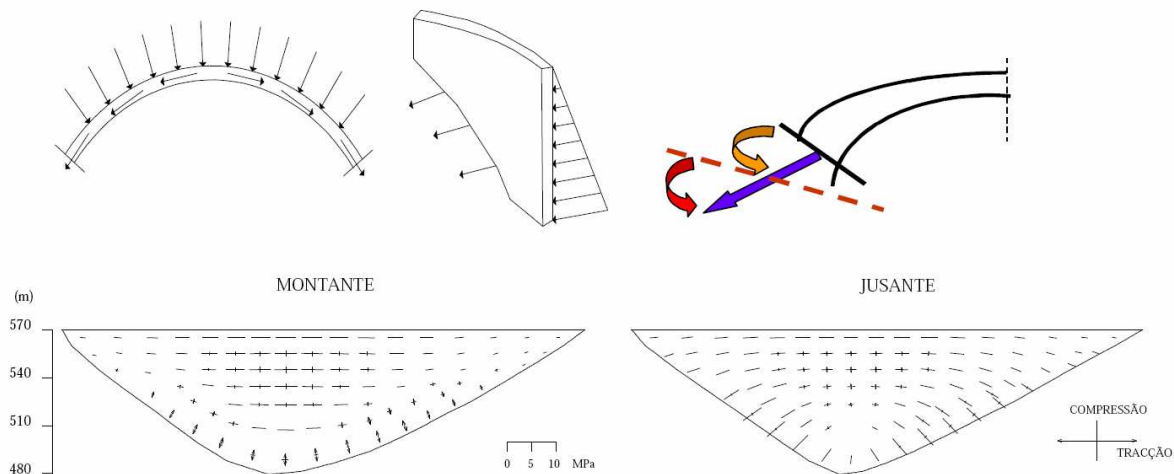


Figura 3 – Princípio básico de funcionamento de uma barragem em abóbada

Sendo o conceito base de dimensionamento de uma barragem abóbada muito simplesmente deverem os arcos "transportar" para os seus apoios o impulso da água, admitiu-se inicialmente um critério de segurança baseado apenas na tensão de compressão admissível no material da barragem, sem que houvesse grandes preocupações relativamente ao comportamento hidráulico e mecânico do maciço de fundação. Esta tensão que começou por ser, no início do século XX, de cerca de 1 MPa foi aumentando gradualmente. No Boletim 61 da Comissão Internacional das Grandes Barragens (ICOLD, 1988), para cenários correntes admitem-se, em regra, compressões até cerca de 8 MPa, havendo mesmo algumas obras com compressões de cerca de 10 MPa, e tracções até 1,0 ou 1,5 MPa

Com a ocorrência de alguns acidentes muito graves e o advento dos métodos de cálculo, particularmente o "trial-load" e os elementos finitos, este último, aliás, evoluindo de método de cálculo para método de dimensionamento, ou seja, passando a ser utilizado para, iterativamente, definir as formas das estruturas (Pedro, J. O., 1978), outros critérios foram introduzidos.

Um dos mais importantes é o do ângulo que a resultante das tensões nos arcos faz com a superfície da rocha na inserção e com as direcções das principais famílias de fracturas do maciço, que deve ser superior a 30° ou mesmo 40°. Na verificação deste critério são efectuados estudos de estabilidade global da barragem e da sua fundação, para solicitações estáticas e dinâmicas.

Nas barragens abóbada os principais cenários de acidente a considerar são o escorregamento no contacto barragem fundação na zona dos rins ou dos encontros, a cedência da fundação nestas mesmas zonas, onde as tensões transmitidas pela superestrutura são mais elevadas (embora se exija para as rochas de fundação das abóbadas, face às tensões que suportam, boa qualidade mecânica), e o eventual esmagamento dos arcos, particularmente no fecho da abóbada, onde se podem instalar tensões de compressão mais elevadas. Também deve ser considerada a eventualidade de escorregamento global ao longo de uma descontinuidade na fundação.

Uma vez que a espessura das abóbadas é sempre pequena quando comparada com as outras dimensões, o dimensionamento é, em regra, feito para a subpressão total, isto é, não tendo em conta a redução induzida pelos sistemas de drenagem eventualmente existentes. No entanto, é preciso ter em conta que o escorregamento no contacto ou segundo superfícies de



descontinuidade na fundação é facilitado pela instalação de subpressões nessas superfícies. Também a percolação de caudais elevados em superfícies de descontinuidade da fundação, ou a lixiviação química dos materiais de preenchimento das fracturas, pode contribuir para a redução do ângulo de atrito.

Assim, a limitação dos escoamentos no maciço rochoso e redução das subpressões, através de um sistema de impermeabilização e drenagem eficaz, é importante no comportamento da fundação a longo prazo. Também o escorregamento global ao longo de uma falha na fundação é facilitado pela instalação de subpressões.

A deterioração pronunciada do betão ou das alvenarias pode também ser gravosa no caso das abóbadas e por maioria de razão face ao nível de tensões instalado. Para situações extremas, como durante a ocorrência de sismos, pode propiciar o colapso de elementos estruturais.

O dimensionamento das abóbadas<sup>9</sup> tira partido da resistência da obra como um todo, sendo então a condição de continuidade estrutural da maior importância. Os cenários de acidente podem então ter origem em situações diversas de deterioração, as quais se sintetizam no Quadro 2.

Nas barragens abóbada a perda de resistência mecânica da fundação, designadamente na zona dos rins ou a cedência de apoio nestas zonas ou nos encontros, pode originar deslocamentos não elásticos no contacto e manifestar-se também nos deslocamentos da superestrutura.

A deterioração da cortina de impermeabilização, a erosão ou lixiviação de materiais de preenchimento das fracturas e a colmatação da drenagem têm reflexo nos caudais e subpressões, podendo também influenciar os deslocamentos, quer ao nível do contacto, quer na superestrutura.

QUADRO 2 – Barragens abóbada. Principais deteriorações que podem contribuir para acidentes

<b>Zona da obra</b>	<b>Deterioração</b>
<b>Fundação</b>	Perda de resistência mecânica da fundação por acções repetidas e/ou prolongadas
	Deterioração da cortina de impermeabilização
	Erosão ou lixiviação
	Colmatação da drenagem
	Cedência de apoio na zona dos rins ou encontros
<b>Corpo da barragem</b>	Perda de continuidade estrutural
	Degradação do betão por reacções químicas
	Degradação das argamassas e caldas de ligação das alvenarias por lixiviação

Consequentemente, no que respeita à fundação das barragens abóbada, deve ser prevista a medição, particularmente na zona dos rins, dos deslocamentos na superfície de contacto e das subpressões no plano da drenagem ou imediatamente a jusante deste, bem como dos caudais drenados dreno a dreno e ainda do caudal total e parcial por zonas da fundação.

Nas obras em que não há galeria de drenagem instalam-se, por vezes, drenos e piezómetros ao longo da inserção a jusante. Nestes casos, tal instalação deve ser precedida de uma análise criteriosa, quer do efeito da drenagem, quer dos resultados, em regra muito limitados, que é possível obter dos piezómetros.

<sup>9</sup> A construção das barragens abóbada, como das outras barragens de betão convencional, faz-se por blocos, o que neste caso face ao critério de dimensionamento global que tira partido da continuidade, pode colocar problemas específicos de estabilidade dos blocos durante a construção.

A perda de continuidade estrutural, grave em barragens abóbada, manifesta-se nos deslocamentos relativos entre as superfícies das juntas de contracção, tendo em princípio também influência nos deslocamentos da superestrutura. A degradação do betão por reacções químicas e a degradação das argamassas e caldas de ligação das alvenarias por lixiviação, ao diminuir a rigidez estrutural, pode, da mesma forma, em casos de deterioração muito pronunciada, influenciar os deslocamentos da superestrutura. As reacções de carácter expansivo podem ser particularmente graves em barragens abóbada, face à grande hiperstaticidade destas estruturas.

Assim, no que respeita ao corpo das barragens abóbada, deve ser prevista a medição de deslocamentos horizontais, deslocamentos verticais e deslocamentos relativos entre as faces das juntas de contracção.

A medição dos deslocamentos horizontais e verticais deve ter em conta que nestas obras, mais uma vez face à exigência de continuidade estrutural, é de interesse a obtenção de deformadas da estrutura, quer segundo os arcos, quer segundo as consolas. Por outro lado, a articulação entre medições de deslocamentos horizontais e relativos entre as faces das juntas de contracção, deve agora tirar partido do comportamento tridimensional da estrutura.

A medição de extensões e de tensões é nas abóbadas de maior interesse, quer pelo valor mais elevado das tensões, quer pelo facto de a continuidade estrutural ter influência agora também nestas grandezas. Em obras em que as tensões no corpo da estrutura sejam muito elevadas, particularmente se sujeitas a processos expansivos, a observação de extensões e tensões pode ser do maior interesse.

No Quadro 3 apresenta-se a listagem das grandezas cuja medição se considera de efectuar em barragens abóbada.

QUADRO 3 – Grandezas a medir e localização dos respectivos aparelhos no caso de barragens abóbada

<b>Grandeza</b>	<b>Equipamento ou método</b>	<b>Zona da obra</b>
<b>Deslocamentos horizontais</b>	Fios de prumo direitos e invertidos	Em vários blocos e a várias cotas por forma a permitir a obtenção de deformadas Pontos situados nos rins, próximo do contacto betão-rocha (fios de prumo invertidos)
	Métodos de geodesia de posição (triangulação, poligonação)	Triangulação: pontos do paramento de jusante, em diversos blocos, segundo planos verticais Poligonação: galerias de visita horizontais
<b>Deslocamentos verticais</b>	Extensómetros de fundação	Pontos situados nos rins próximo do contacto betão-rocha a montante e a jusante
	Nivelamentos de precisão	Coroamento ou galeria horizontal a cota elevada; galerias horizontais (se existirem) próximo da inserção em articulação com extensómetros de fundação
<b>Movimento relativos entre faces de juntas de contracção</b>	Bases de alongâmetro e medidores de movimento de juntas	Principais juntas de contracção, próximo do coroamento e da inserção, em articulação com os pontos em que são observados deslocamentos horizontais
<b>Caudais</b>	Drenos e bicas	Caudal dreno a dreno; caudais parciais por zonas da obra: fundo do vale, encosta esquerda, encosta direita; caudal total;
<b>Subpressões</b>	Piezómetros; células piezométricas	Na superfície de contacto da barragem com a fundação, particularmente nos rins e encontros

<b>Extensões no betão</b>	Extensómetros	Em todo o corpo da barragem mas particularmente no fecho dos arcos, em pontos próximo de montante e jusante, e nos rins a jusante
<b>Tensões no betão</b>	Tensómetros	Em pontos seleccionados de acordo com objectivos específicos
<b>Nível na albufeira</b>	Escala de níveis Limnógrafo Limnímetro	Nível da água a montante Nível da água a jusante, em barragens com nível a jusante significativo
<b>Temperatura</b>	Temperatura ambiente: termógrafo e termómetro de máxima e mínima	Em local seleccionado próximo da barragem
	Termómetros de resistência eléctrica; pares termoeléctricos	Em todo o corpo da barragem por forma a caracterizar o estado térmico em articulação com outra aparelhagem eléctrica que permita a medição da temperatura
<b>Acções sísmicas</b>	Sismógrafos	Em casos especiais (obras de grande altura) em três pontos: no coroamento e base da consola central e num dos encontros
<b>Deformabilidade do betão</b>	Células de fluência	Em zonas do núcleo e para caracterização dos betões dominantes
<b>Variações de volume do betão</b>	Extensómetros correctores	Em zonas do núcleo e para caracterização dos betões dominantes

### Barragem de aterro zonada

Uma barragem de aterro zonada é uma estrutura gravítica que baseia o seu funcionamento do ponto de vista hidráulico na disposição criteriosa dos materiais no seu perfil.

As acções a ter em conta no dimensionamento de uma barragem de aterro, são o peso próprio, as acções da água e as acções sísmicas. Na Figura 4 apresenta-se o perfil de uma barragem de aterro zonada e os resultados do cálculo de percolação dessa barragem. Indica-se ainda, de forma esquemática, o movimento da água através do corpo da barragem e da fundação.

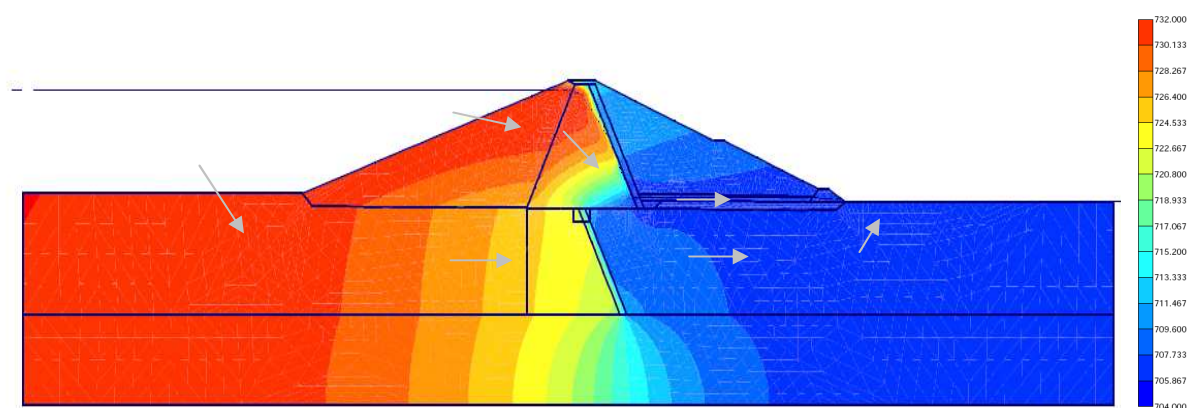


Figura 4 – Percolação através de uma barragem de aterro zonada e respectiva fundação

Uma das características mais marcantes das barragens de aterro é o facto de serem menos exigentes, no que respeita às fundações que as barragens de outros tipos. No entanto, ainda assim, é fundamental que, quer do ponto de vista hidráulico quer do ponto de vista mecânico, determinadas condições sejam verificadas. Além disso é sempre importante verificar os dados históricos sobre acidentes neste tipo de estruturas. A análise destes dados é fundamental para se conhecer as causas dos insucessos evitando que os mesmos se repitam.

Um levantamento dos acidentes e incidentes em barragens de aterro permitiu verificar que uma grande parte se ficou a dever a problemas de erosão interna e piping (cerca de 55%) e que outra parcela significativa estava associada a problemas de galgamento ou deformação excessiva (11%+14%). Em conjunto estas causas representam praticamente 76% dos casos de acidente. Outro aspecto de grande importância é o facto de, neste tipo de barragens, a maioria dos acidentes (cerca de 70%) ocorrer durante os primeiros anos de vida das obras e, em particular durante o primeiro enchimento.



Figura 5 – Estatísticas de acidentes em barragens de aterro (adaptado de Fell, et al. 1992)

Atendendo ao acima exposto é fácil de deduzir que, na observação de uma barragem de aterro, a maior atenção deve ser dada à medição dos níveis piezométricos, tanto no aterro como na fundação e, adicionalmente, à medição dos caudais percolados. Em casos especiais, para obras de maior importância fará ainda sentido prever a utilização de dispositivos diferentes (por exemplo de resposta mais rápida) para a fase de primeiro enchimento.

De igual forma, em especial nas barragens de maiores dimensões, terá de ser dada especial atenção à monitorização dos deslocamentos superficiais ou internos, consoante a dimensão e importância da obra. Em geral, no caso de barragens de menor dimensão ou de menor importância, considera-se que, no que respeita aos deslocamentos, a monitorização dos deslocamentos superficiais verticais é suficiente, uma vez que problemas que existam, manifestar-se-ão, em princípio, à superfície.

#### Pontes de betão armado pré-esforçado

O betão armado pré-esforçado é o material utilizado na maioria das pontes construídas em Portugal, designadamente, nas grandes pontes. Estas são, de uma forma geral, construídas pelo designado método dos avanços sucessivos, que consiste na construção do tabuleiro a partir do topo dos pilares, através de consolas progressivamente crescentes (Figura 6).



Figura 6 - Ponte Miguel Torga durante a construção pelo método dos avanços sucessivos

As grandes pontes construídas pelo método dos avanços sucessivos têm importância acrescida, desde logo pela sua dimensão, mas também uma complexidade significativa, decorrente do método construtivo utilizado, que implica uma correcta previsão do comportamento estrutural elástico e diferido, de forma a permitir a adequada ligação das consolas – o designado “fecho” do tramo. A previsão do comportamento diferido do betão é ainda muito relevante no comportamento estrutural a longo prazo das pontes construídas desta forma, na medida em que há uma variação do sistema estrutural no decurso da construção: estruturas em consola tornam-se, após os fechos, estruturas contínuas. Nestas circunstâncias acentuam-se os efeitos do comportamento diferido dos materiais no comportamento estrutural, que se traduzem na ocorrência de redistribuições de esforços, aumento das deformações e perdas de pré-esforço.

Embora variando com as características particulares de cada estrutura, na observação de uma ponte de betão as grandezas mensuráveis mais significativas do ponto de vista do seu comportamento estático são, normalmente, os deslocamentos lineares e angulares, as extensões e as temperaturas relativas aos diversos elementos estruturais. Nos tabuleiros assume particular importância a medição de deslocamentos verticais e a medição de abertura

de juntas, enquanto que nos pilares e torres de pontes atirantadas é mais relevante a medição de deslocamentos horizontais e rotações. A medição das forças instaladas em tirantes, cabos de pré-esforço ou aparelhos de apoio, quando possível, fornece também elementos muito significativos. Para uma correcta interpretação do comportamento da estrutura é ainda importante a realização de ensaios que permitam determinar as características mecânicas e reológicas do betão, tais como a tensão de rotura à compressão, o módulo de elasticidade, a retracção e a fluência.

### **Sistemas de observação**

Para além dos aspectos acabados de referir a definição do sistema de observação de uma grande estrutura, conjunto dos seus sistemas de instrumentação, obedece a alguns critérios complementares que se considera de interesse salientar. Assim, deve atender-se à complementaridade de alguns dos sistemas e à eventual necessidade da sua redundância. De facto, se por um lado, certas grandezas podem justificar, pela sua importância, a medição por vários meios independentes, por outro é quase sempre possível tirar partido da interdependência, em termos de comportamento estrutural ou hidráulico, de determinadas variáveis de controlo, de forma a tornar os sistemas de observação menos pesados e portanto menos onerosos.

A observação de deslocamentos, quer horizontais, quer verticais, é da maior importância, razão pela qual nas obras de maior risco se dispõe, em regra, de meios alternativos e independentes para a sua observação.

Apresentam-se seguidamente os sistemas de observação instalados em três grandes estruturas construídas em Portugal: a barragem de Alqueva, uma abóbada espessa de construção recente no sul, a barragem do Pinho em Vila Real, no norte do país e a ponte de São João sobre o rio Douro, na cidade do Porto.

#### Sistema de observação da barragem de Alqueva

Na barragem de Alqueva, uma barragem do tipo abóbada espessa, concluída em 2001 (Figura 7), estão instalados 7 fios de prumo (Figura 8), estão materializadas poligonais nas galerias horizontais de visita e está ainda instalado um sistema de triangulação por jusante. A localização dos pontos de medição visa a obtenção de deformadas dos arcos e das consolas da abóbada relativamente a pontos profundos, permite a comparação entre deslocamentos observados pelos diferentes sistemas e atende a aspectos particulares do comportamento previsto para a barragem, designadamente os decorrentes da existência de uma falha do lado da encosta esquerda.



Figura 7 – Barragem de Alqueva. Vista de jusante

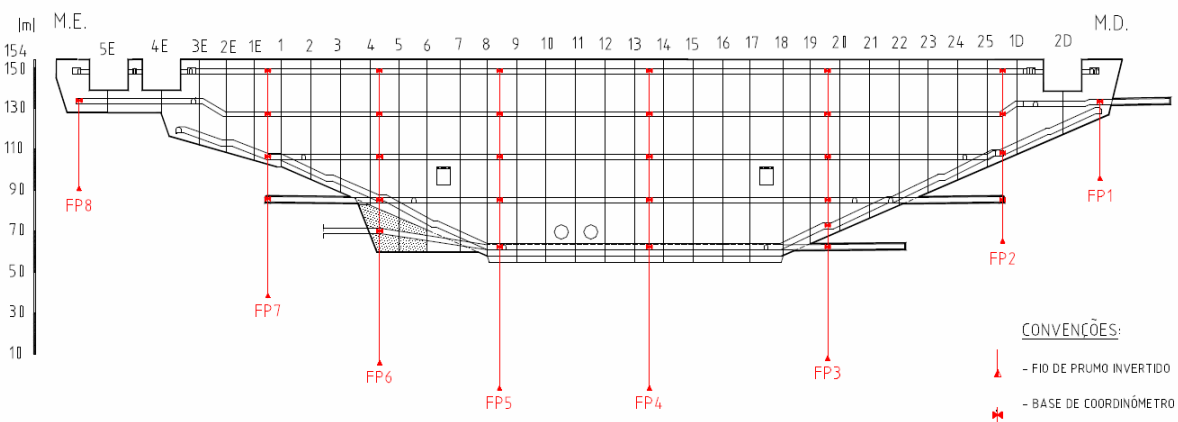


Figura 8 – Sistema de fios de prumo instalado na barragem de Alqueva – 8 fios de prumo invertidos; 31 bases de coordenómetro

Da mesma forma, para observação de deslocamentos verticais, estão materializadas linhas de nivelamento de precisão nas galerias horizontais de visita e no coroamento e estão instalados extensómetros de fundação ao longo da inserção (Figura 9), na galeria de drenagem e nas galerias radiais que a cortam, sendo possível a obtenção de deformadas verticais e a comparação entre os deslocamentos observados pelos dois sistemas. Em certos pontos é possível a observação simultânea de deslocamentos horizontais e verticais, bem como de rotações em torno de eixos montante jusante, estas a partir de deslocamentos verticais observados por extensómetros de fundação na extremidade de galerias radiais.

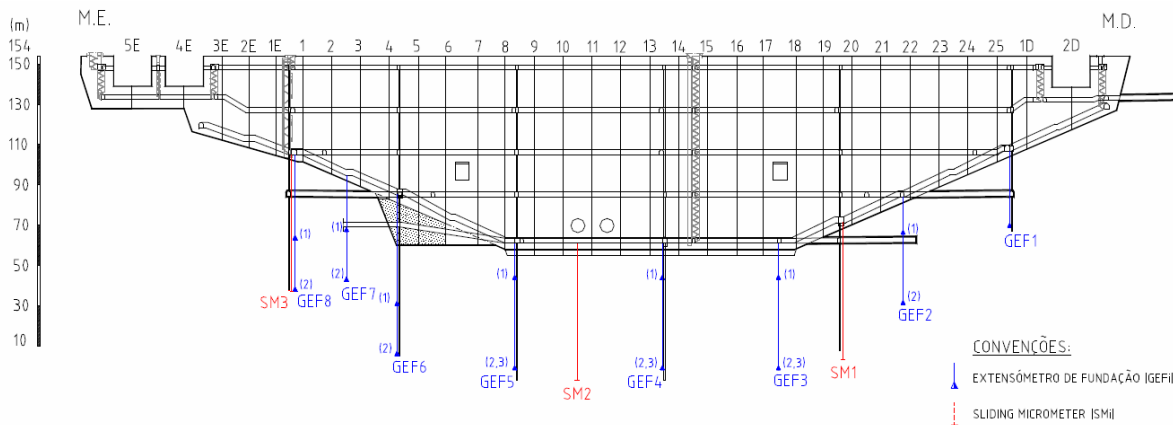


Figura 9 – Sistema de extensómetros de fundação da barragem de Alqueva –  
4 extensómetros de fundação simples; 7 extensómetros de fundação duplos

As galerias horizontais de visita foram prolongadas para o interior da fundação o que, para além de permitir uma maior eficácia na drenagem do maciço, permite também o prolongamento das linhas de poligonação e nivelamento para o interior da fundação e a sua amarração a pontos profundos na extremidade dessas galerias. A observação por métodos geodésicos no interior de galerias tem a vantagem relativamente à observação no exterior, de não depender das condições atmosféricas.

A conjugação da medição e análise de algumas grandezas interdependentes constitui uma verificação da coerência dessas medições. É o caso da medição dos deslocamentos horizontais e verticais dos blocos e dos deslizamentos entre as suas faces. Os deslocamentos horizontais medidos por exemplo por fios de prumo num bloco podem ser transmitidos para os blocos adjacentes por meio dos deslizamentos observados nas juntas de contracção e assim sucessivamente de bloco em bloco até que sejam comparados com os valores observados em outros fios de prumo instalados em blocos afastados.

A definição do sistema piezométrico para controlo das subpressões instaladas na fundação depende da definição da rede de drenagem, peça integrante do projecto, e articula-se com esta visando a avaliação da eficiência do sistema de impermeabilização e drenagem, isto é, o controlo desta eficiência é feito pela análise conjugada da evolução dos valores dos caudais e das subpressões medidos.

Em regra, é de interesse conhecer o valor das subpressões ao longo do plano da drenagem ou imediatamente a jusante deste e, complementarmente, mais a jusante, em algumas zonas definidas pelas características de permeabilidade do maciço. Nas Figuras 10 e 11 apresenta-se a definição das redes piezométrica e de drenagem instaladas na fundação da barragem do Alqueva.



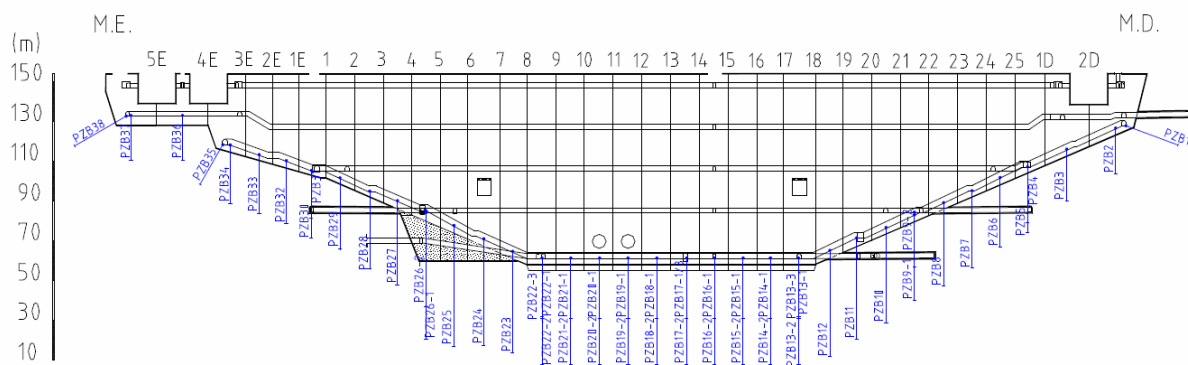


Figura 10 – Rede piezométrica da fundação da barragem do Alqueva.

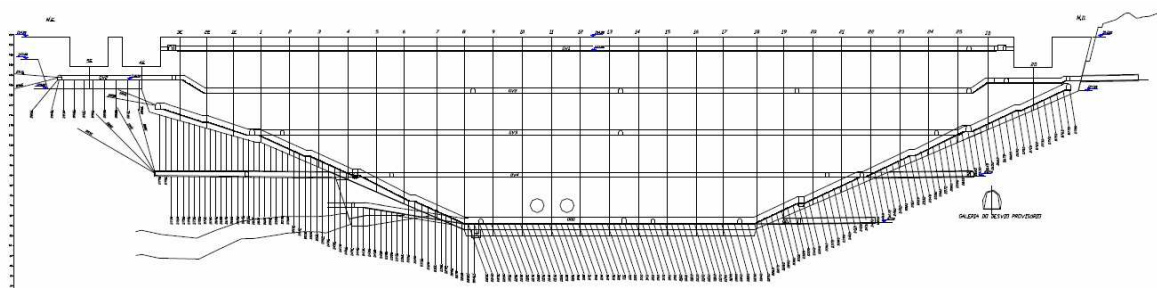


Figura 11 – Rede de drenagem barragem de Alqueva

### Sistema de observação da barragem do Pinhão

A barragem do Pinhão situa-se no concelho de Alijó, no distrito de Vila Real, intersecta o rio Pinhão e destina-se a criar uma albufeira com o volume total de  $4,24 \times 10^6 \text{ m}^3$  para o NPA, cujo objectivo primordial é o abastecimento urbano. Trata-se de uma barragem de enrocamento de granito em que o órgão de impermeabilização é uma cortina de betão colocada no paramento de montante.

As características gerais da barragem mais relevantes do ponto de vista da apreciação do sistema de observação são:

- Cota do coroamento 682,5;
- Nível de máxima cheia (NMC): 680,5 m ( $V=5,19 \text{ hm}^3$ );
- Nível de pleno armazenamento (NPA): 679 m ( $V=4,24 \text{ hm}^3$ );
- Nível mínimo de exploração (Nme): 671 m ( $V=0,64 \text{ hm}^3$ ).

A altura máxima da barragem acima da fundação é de 22 m. A folga para o NMC é de 2,0 m, enquanto que para o NPA é de 3,5 m.

O coroamento, com uma extensão de 280 m, tem 7 m de largura e desenvolve-se segundo um alinhamento recto. Os paramentos de montante e jusante apresentam inclinações de, respectivamente, 1:1,4 (v:h) e 1:1,5 (v:h), tendo este último uma banquetta de largura 3,0 m, à cota 672,5 m.

A barragem localiza-se numa zona planáltica com um vale muito aberto e assimétrico. Os encontros apresentam-se suaves, com inclinações médias de 1:8,8 (v:h) para a ME e 1:4,2 (v:h) para a MD.

De acordo com a caracterização geológico-geotécnica, a fundação da barragem é constituída essencialmente por um maciço granítico, de grão médio e grosseiro, profiróide, de boa qualidade.

Na Figura 12 apresenta-se uma vista da barragem no início do primeiro enchimento.



Figura 12 – Vista da barragem do Pinhão

No que respeita à permeabilidade, o maciço tem permeabilidade baixa a muito baixa. No entanto, em algumas sondagens não foi possível realizar os ensaios Lugeon por insucesso da obturação o que poderá estar relacionado com a existência de fracturas mais extensas e que, naturalmente, condicionarão o comportamento hidráulico do maciço.

Neste tipo de barragens, de enrocamento com cortina de impermeabilização a montante, é fundamental a monitorização das pressões intersticiais que ocorrem na fundação. Esta inclui uma cortina de impermeabilização debaixo do plinto que serve de fundação à cortina pelo que é suficiente monitorizar a variação da pressão a jusante deste órgão. Essa monitorização permitirá registar os níveis piezométricos e relacioná-los com as variações do nível da água na albufeira.

Complementarmente, é importante captar e medir os caudais que afluem ao sistema de drenagem, podendo-se assim detectar e acompanhar a evolução de quaisquer anomalias que possam surgir durante a vida útil da barragem, como por exemplo, os que se relacionam com a eficiência da cortina de injeções ou da cortina de impermeabilização.

Outro aspecto fundamental na apreciação do comportamento da barragem consiste no controlo das deformações do aterro, de forma a detectar qualquer comportamento anómalo da estrutura, em especial aqueles que podem afectar o funcionamento da cortina de impermeabilização de montante, órgão essencial no funcionamento da estrutura. Assim, devem ser instalados dispositivos que permitam a medição dos deslocamentos superficiais, nas três direcções do espaço – marcas superficiais - e, complementarmente, dispositivos que permitam a medição de deslocamentos no interior da barragem, em especial aqueles que se relacionam com o funcionamento da cortina – inclinómetros verticais e inclinados.

As Figuras 13 e 14 apresentam, em planta e segundo um perfil transversal, a localização dos dispositivos mencionados (Marcelino, 2007).

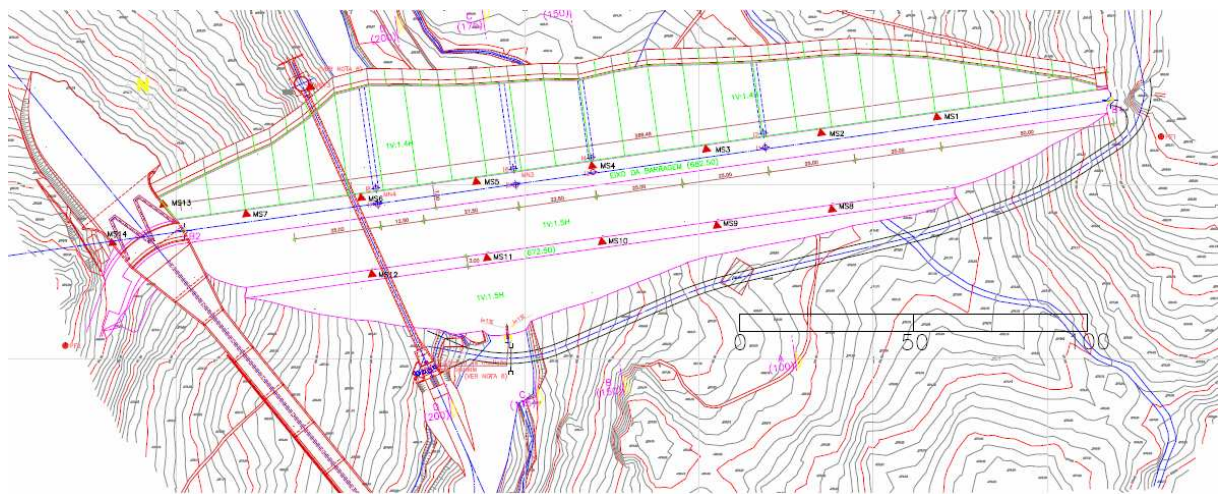


Figura 13 – Planta da barragem do Pinhão com a localização dos equipamentos de observação

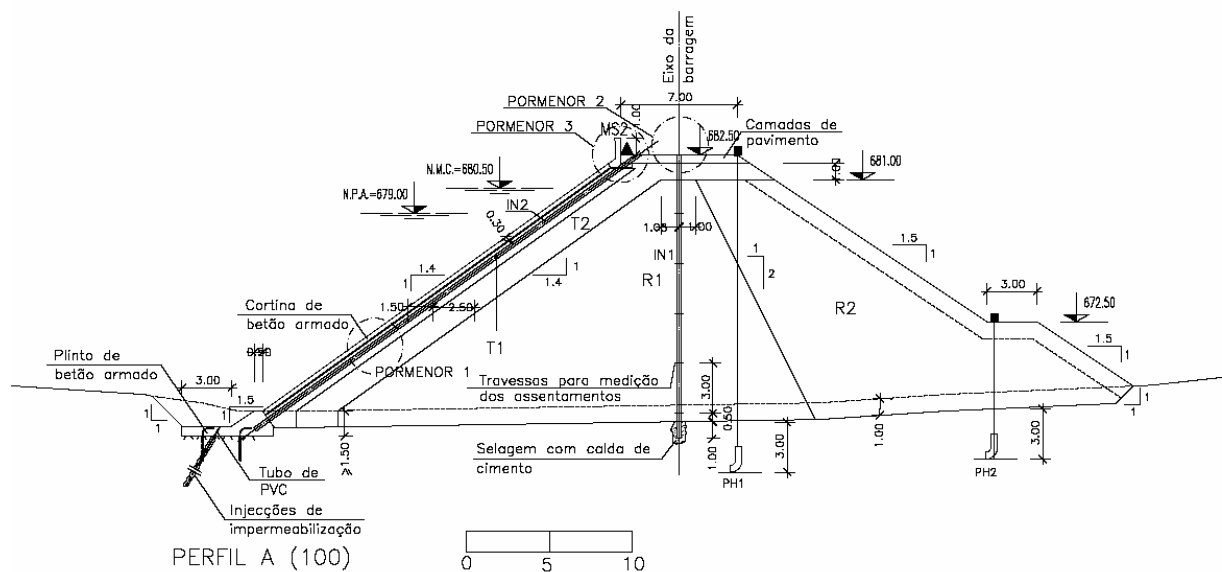


Figura 14 – Exemplo de perfil transversal com os dispositivos de observação (marcas superficiais, piezómetros na fundação e inclinómetros)

## Sistema de observação da ponte de São João

A ponte ferroviária de São João, sobre o rio Douro, na cidade do Porto, cujo projecto é da autoria do Prof. Edgar Cardoso, é uma estrutura de betão armado pré-esforçado, contínua com os viadutos de acesso, com uma extensão total de 1028 m (Figura 15). A ponte vence um vão de 250 m e dois vãos laterais adjacentes de 125 m. O tabuleiro é constituído por uma viga caixão bicelular, cuja altura varia entre 14 m, sobre os pilares, e 7 m, a meio vão, tendo sido construído em consola, por avanços sucessivos a partir dos pilares centrais. Estes têm uma altura de 50 m, são circulares na base passando a rectangulares com o seu desenvolvimento em altura.



Figura 15 – Ponte de São João. Vista de jusante

Os trabalhos de observação da estrutura realizados pelo LNEC iniciaram-se em Outubro de 1986, durante a construção, tendo a ponte entrado ao serviço em Junho de 1991. A instrumentação então efectuada consistiu, fundamentalmente, na medição de extensões, temperaturas e rotações em diversas secções da estrutura, tendo igualmente sido colocadas bases de nivelamento nas secções de meio vão, de apoio e nas secções de quatro de vão do tramo central, para medição dos deslocamentos verticais ao longo do tempo e bases de alongâmetro para controlar a variação da largura das juntas de dilatação (Castanheta, 1993).

A localização das catorze secções onde são medidas extensões, temperaturas ou rotações está indicada na Figura 16, sendo que dez dessas secções são do tabuleiro e as restantes são nos pilares. Nestas secções foram colocados 124 extensómetros de corda vibrante, 97 pares termoelectrónicos de cobre-constantan e quatro bases para clinómetros de bolha de ar. Durante a betonagem das secções instrumentadas foram executados provetes que permitiram a caracterização da resistência, módulo de elasticidade, retracção e fluência do betão.

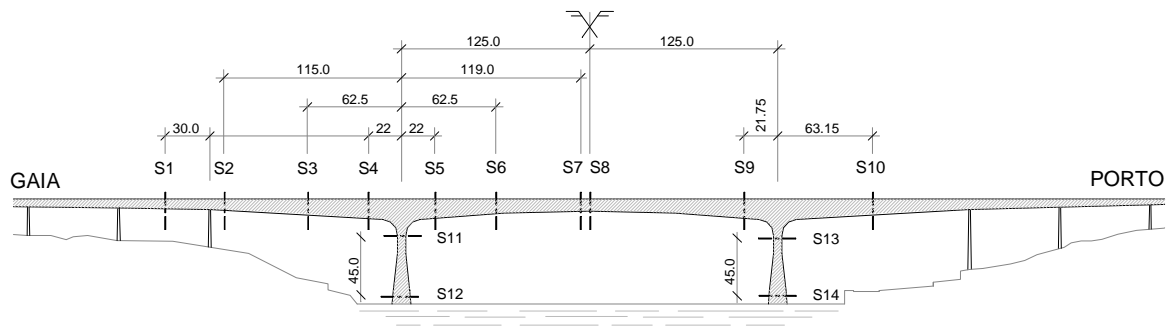


Figura 16 – Ponte de S. João: Localização das secções instrumentadas

A disposição dos extensómetros nas secções do tabuleiro obedeceu ao seguinte critério: nas secções localizadas junto aos pilares (S4, S5 e S9), com uma grande altura e uma laje de fundo muito espessa, foram colocados extensómetros em quatro níveis, na laje superior, nas almas e junto às faces superior e inferior da laje de fundo; nas restantes secções foram colocados extensómetros na laje superior e inferior. O exposto está ilustrado na Figura 17 onde se apresenta uma secção instrumentada, localizada junto ao pilar (secção S5).

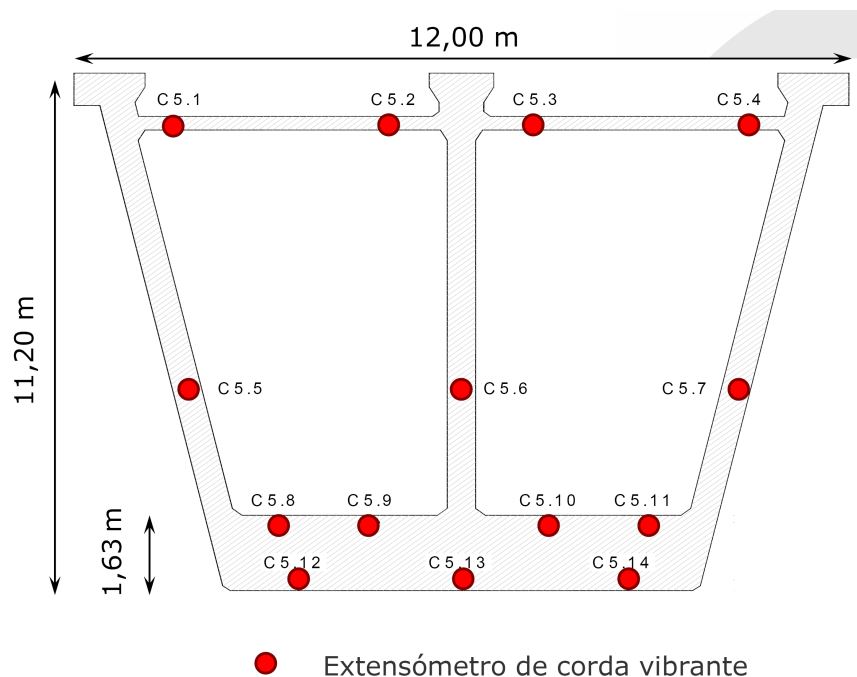


Figura 17 – Ponte de S. João: secção instrumentada com extensómetros de corda vibrante

Um aspecto particularmente interessante desta obra prende-se com o facto de recentemente ter sido realizada uma actualização da instrumentação de forma a permitir a automatização das leituras. Com efeito, foram instalados dois sistemas de nivelamento hidrostático, permitindo a medição dos deslocamentos verticais do tabuleiro, quatro sensores magnetostrictivos, para medição da variação das larguras das juntas de dilatações, e quatro clinómetros eléctricos, de forma a controlar as rotações na base e no topo dos pilares, para além um conjunto de loggers, ligados em rede através de cabo de fibra óptica.

## **Exploração dos sistemas de observação**

### Aspectos gerais

O Plano de Observação, como já foi referido, deve definir regras gerais a respeitar durante a vida da estrutura relativas à exploração dos sistemas de observação. Esta exploração deverá ter em conta, em primeiro lugar, as preocupações respeitantes ao controlo da segurança e da funcionalidade, mas atender, também, ao interesse da verificação das hipóteses de projecto e a aspectos relativos à investigação.

A definição da periodicidade da recolha de dados é, normalmente, dependente das especificidades de cada obra, ditadas, entre outros aspectos, pelo seu comportamento, importância relativa de cada sistema de observação, facilidade do seu uso e fase da vida da obra.

Relativamente às barragens as Normas de Observação e de Inspeção do Regulamento de Segurança de Barragens português (CSOPT, 1990) recomendam frequências de leitura das diversas grandezas e aparelhagem, tendo em conta a importância da barragem, aferida pela sua altura e o seu período de vida. Por exemplo, para uma grande barragem de betão, com mais de 50 m de altura em fase de exploração normal, aquelas normas recomendam, para a generalidade da aparelhagem embebida, a realização de campanhas quinzenais, e para a observação por métodos de geodesia de posição, a realização de campanhas anuais.

Durante a fase de entrada em exploração (primeiro enchimento, ensaio de carga) e em períodos particulares de vida das obras (reenchimentos, após reabilitações, após cheias ou sismos) definem-se programas especiais de leitura.

Quando a recolha de dados é feita automaticamente, caso em que é possível fazer “campanhas”, por exemplo, de hora a hora, um dos critérios de arquivo possível consiste em manter em arquivo temporário os dados referentes ao último mês de leituras e em arquivo definitivo duas campanhas por mês, correspondentes a situações extremas de solicitação ou dos valores da variável de controlo em causa.

Na observação de pontes a periodicidade das medições sofreu, naturalmente, grandes alterações com a introdução dos sistemas de aquisição automática. Com efeito, tradicionalmente a realização de campanhas de observação após a entrada em serviço das obras de arte tinha uma periodicidade quadrimestral, evoluindo progressivamente para semestral. O advento da aquisição automática permitiu a introdução de taxas de aquisição muito superiores, podendo-se distinguir as situações associadas à caracterização do comportamento estático e do comportamento dinâmico. No primeiro caso, a realização de leituras diárias, preferencialmente realizadas de madrugada, é suficiente para registar a evolução sazonal e a longo prazo do comportamento estrutural; a realização de diversas leituras ao longo do dia, no limite horárias, permite um conhecimento da evolução diária das diversas grandezas, muito associada ao efeito da variação de temperatura ao longo do dia. Caso se pretende a caracterização do comportamento dinâmico será necessário recorrer a taxas de aquisição compreendidas entre 200 Hz e 1000 Hz, embora eventualmente apenas durante períodos limitados do dia.

Ao contrário do que se passa relativamente às barragens, a regulamentação portuguesa é omissa em relação à observação do comportamento estrutural de pontes. Merecem contudo referência as recomendações da CEB-FIP (1988) e da FIB (2003) que, de uma forma sistematizada, apresentam um resumo das principais grandezas a observar, referindo métodos e técnicas de medição, incluindo também alguns casos de estudo.

## Recolha, tratamento, validação e transmissão dos dados de observação

A recolha dos dados das observações é feita, na generalidade das obras, de forma manual. No entanto, desde há muito, que em diversos países se vem fazendo um esforço para automatização da recolha. As maiores dificuldades prendiam-se com a garantia da prolongada fiabilidade dos equipamentos, aos quais se exige um elevado grau de precisão ao longo de décadas de funcionamento, em condições térmicas agressivas e higrométricas por vezes próximas da saturação. Nas últimas décadas têm sido dados passos importantes para a solução dos problemas existentes, havendo hoje sistemas bastante fiáveis.

Em Portugal estão em funcionamento, em algumas barragens de betão, sistemas de recolha automática de deslocamentos, caudais, subpressões, movimentos de juntas, tensões e extensões e está a fazer-se um esforço sério na automatização da recolha de dados da observação das estruturas mais importantes.

Em algumas barragens de aterro existem também sistemas de recolha automática de dados mas, em geral, esse tipo de sistema apenas cobre uma pequena parte dos equipamentos instalados. Um dos problemas deste tipo de sistemas é obrigarem a avultados investimentos iniciais o que os torna pouco acessíveis a muitos dos donos de obra.

As pontes construídas depois de 1997 cujo comportamento estrutural é observado pelo LNEC estão todas dotadas de sistemas de aquisição automática. É o caso da ponte Miguel Torga, sobre o rio Douro na Régua (1997), do prolongamento da pista do aeroporto internacional da Madeira (2000), da ponte Salgueiro Maia, sobre o rio Tejo em Santarém (2000) e da ponte Rainha Santa Isabel, sobre o rio Mondego em Coimbra (2004). Como referido anteriormente, realizou-se recentemente a automatização da observação da ponte de São João, estando actualmente em curso a instalação de uma nova instrumentação da ponte 25 de Abril, sobre o rio Tejo, em Lisboa, também com implementação da aquisição automática. Nas restantes pontes a recolha dos dados das observações é efectuada de forma manual, através da realização de campanhas periódicas.

O tratamento dos dados das observações, ou seja a passagem dos dados brutos às grandezas, por exemplo a passagem de um volume medido e de um tempo cronometrado a um caudal, é hoje feito de forma automatizada, em computadores instalados nas obras ou, mais correntemente, em computadores remotos. Neste caso a transmissão de dados é feita, nas obras mais importantes, por linhas de dados, utilizando a rede telefónica comutada ou linhas dedicadas.

Em algumas obras, em que, pela sua localização, haja dificuldades na instalação de linhas de transmissão de dados, tem-se recorrido à transmissão via satélite ou através de sistemas de comunicação móveis. Tem-se procedido, outras vezes, à instalação local de dispositivos de registo de longa duração, cuja recolha é feita apenas quando é possível.

Os dados e os resultados das observações são validados antes de arquivados, devendo esta validação, quando possível, ser feita em obra.

O estabelecimento de limites de validação para os dados, em princípio destinados à detecção de erros grosseiros, faz-se ou a partir das características dos próprios aparelhos, eventualmente os seus campos de medida, ou através de valores extremos, definidos pelo seu histórico anterior, eventualmente majorados segundo critérios físicos associados à previsível evolução das grandezas correspondentes.

O estabelecimento de limites de validação para os resultados faz-se de forma dependente da fase de vida da obra, tendo em conta, portanto, a informação previamente existente. Durante a construção, estes limites definem-se, como para os dados, a partir das grandezas

correspondentes aos campos de leitura dos aparelhos. Na fase de entrada em serviço é adicionada a esta informação a relativa aos modelos de dimensionamento, calibrados com base nos resultados dos ensaios de caracterização das propriedades dos materiais, efectuados durante a construção. Posteriormente, em fase de exploração, é possível, em regra, estreitar estes limites com recurso ao tratamento estatístico dos dados entretanto colhidos e ao apoio de modelos.

A validação em obra permite, se necessário, a imediata verificação das leituras duvidosas, as quais poderão ser repetidas. Uma vez validados, os dados e os resultados das observações são arquivados informaticamente, em bases de dados que possibilitam o seu fácil acesso e interpretação.

Em Portugal está em utilização, ainda em fase experimental, na generalidade das grandes barragens de betão, um sistema integrado de tratamento, arquivo e análise dos dados da observação das obras, designado por *gestBarragens*, o qual substituirá, a breve trecho, o sistema anterior, datado de início da década de 1980 e designado Sistema de Informação para Observação de Barragens (SIOBE), (Gomes, A. F. S., 1981).

O sistema *gestBarragens* (Portela, E. A., 2007) é um sistema integrado para o monitoramento estrutural de barragens de betão, que é acedido via Intranet ou via Internet por utilizadores autorizados e que está estruturado em módulos: gB-Suporte, gB-Observações, gB-Modelos, gB-Inspeções Visuais, gB-Documentação, gB-SIG e gB-Testes e Análises. O sistema permite a utilização e a exploração integrada de toda a informação relativa a cada obra – elementos de projecto, dados de construção, resultados da exploração dos sistemas de observação, da utilização de modelos, de inspeções visuais, de ensaios de materiais, etc.

Presentemente está a ser transferida para este sistema toda a informação relativa a cerca de 120 grandes barragens de betão.

Nas barragens de aterro, até ao momento, após um investimento importante no sentido de adoptar o mesmo tipo tratamento, arquivo e análise dos dados da observação das obras em betão (Marcelino, 1986) optou-se por usar sistemas “feitos à medida” para cada obra, normalmente usando programas comerciais de produtividade geral do tipo base de dados e folhas de cálculo. É de prever que, num futuro próximo, se venha a adoptar o sistema *gestBarragens* com as necessárias adaptações.

Na observação de pontes o esforço de desenvolvimento está a ser feito no sentido de uma progressiva instalação de sistemas de aquisição automática, explorando as capacidades de aquisição e de processamento dos dados proporcionados pela utilização de *loggers*. Esta capacidade de processamento é significativamente reforçada pelo recurso a computadores industriais instalados nas obras. Torna-se assim possível aliar a vantagens como a realização quase simultânea das leituras com registo contínuo ou periódico, dispensando a presença de operadores, uma importante capacidade de processamento e transmissão de dados.

Esse processamento envolve a validação dos dados, que deverá ser efectuada de forma automática pelo próprio sistema, imediatamente após a sua aquisição, para detectar eventuais anomalias na medição. Torna-se, assim, possível a eliminação dos valores incorrectos, a eventual repetição de leituras e, conseqüentemente, a obtenção de amostras completas e comprovadas que irão ser posteriormente analisadas. Na validação dos dados assume particular relevo o recurso a métodos estatísticos (Aktan *et al*, 2003).



## ESTABELECIMENTO DE LIMITES DE VALIDAÇÃO. MODELOS DE PREVISÃO

O estabelecimento de limites de validação propicia a definição de alarmes, os quais podem ser um precioso auxiliar dos técnicos responsável pelas operações de monitorização.

A probabilidade de um valor observado à posteriori estar contido em faixas de tolerância, ou limites de validação das variáveis de valor  $n\sigma$  ( $n=2,3, \dots$ ) em torno do valor previsto  $E_p$ , pode ser obtida numa tabela de distribuição normal, sendo recomendáveis os seguintes critérios, aos quais correspondem diferentes alarmes que podem ser automaticamente accionados pelo sistema (Gomes, A. F. S., 1981):

- se o valor observado  $E_i$  estiver contido na faixa definida pelo valor previsto  $E_p \pm 2\sigma$ , isto é, se  $E_p - 2\sigma < E_i < E_p + 2\sigma$ , é considerado normal, (probabilidade  $P=0.954$ ), nada havendo a assinalar;
- se o valor observado estiver contido na faixa definida por  $E_p \pm 3\sigma$  ( $P=0.997$ ), suscita ligeiras dúvidas, mas é ainda aceitável;
- se  $3\sigma < E_p - E_i < 5\sigma$ , as dúvidas em relação ao valor observado começam a ser muito grandes e o grau de aceitabilidade reduzido, impondo-se uma análise cuidada da situação;
- finalmente, se  $E_p - E_i > 5\sigma$ , ( $P=0.999$ ), o valor observado é considerado fora do normal, exigindo uma análise imediata da situação.

Apresentam-se seguidamente critérios para o estabelecimento de limites de validação de algumas variáveis para os diferentes tipos de obras.

### Barragens de betão

O estabelecimento de limites de validação para os resultados da observação de barragens de betão tem sido feito de forma diferenciada consoante a grandeza em causa e o tipo de modelos de previsão disponíveis, havendo neste domínio um espaço amplo de investimento por realizar. De facto, se para algumas destas grandezas, designadamente deslocamentos e extensões, existem hoje sofisticados modelos de previsão, para outras, particularmente as relativas ao comportamento hidromecânico da fundação, há ainda muito por fazer.

Os modelos utilizados para a previsão da evolução dos deslocamentos e extensões são, basicamente, de dois tipos:

- modelos estatísticos, que a partir dos valores destas variáveis observados num determinado período e da minimização dos desvios, entre os valores observados e os valores previstos através de relações funcionais muito simples estabelecidas entre as principais acções e as respostas, permitem a previsão destas e da sua variabilidade num período seguinte;
- modelos numéricos de análise estrutural que permitem estimar as respostas e a sua variabilidade num determinado período, após a sua calibração com as respostas observadas num período anterior e tendo em conta o conhecimento da variabilidade das principais acções e das propriedades reológicas dos materiais.

Uma condição básica para a utilização destes modelos de previsão é que não ocorram alterações significativas nas propriedades estruturais e no domínio das acções entre o período de calibração e o período posterior.

Ambos os modelos permitem a consideração de processos de deterioração, desde que a sua evolução no período para que se fazem as estimativas seja semelhante à do período de calibração.

Nos modelos estatísticos que têm vindo a ser empregues, designados por modelos de interpretação quantitativa, as relações funcionais entre as acções e as respostas são de natureza semi-empírica e do tipo,

$$E_j(h, t', t) = E_n(h_j) + E_T(t'_j) + E_t(t_j) + K + r_j = E_j^{calc} + r_j \text{ em que } E_j$$

representa a resposta observada na época  $j$  e  $h$  é a diferença entre o nível de montante e o de jusante. A variável  $t$ , contada em dias, pode ser calculada a partir de uma época de referência a meio do período construtivo, do início do primeiro enchimento ou do início do período de calibração do modelo;  $t'$  é o tempo em dias contado desde o início do ano a que respeita a época  $j$ ;  $K$  é uma constante que correspondente à diferença entre valores observados e calculados no início do período de calibração;  $r_j$  é a diferença entre o valor calculado e o valor observado na época  $j$  (Braga, L., 2000).

No segundo membro da equação  $E_n(h_j)$  representa o efeito da pressão hidrostática,  $E_T(t')$  o efeito da variações sazonais de temperatura e  $E_t(t_j)$  o efeito do tempo. Estas funções são habitualmente do tipo

$$E_n(h) = \sum_{i=1}^N a_i h^i$$

$$E_T(t') = b_1 \cos \frac{2\pi t'}{365} + b_2 \sin \frac{2\pi t'}{365}$$

$$E_t(t) = \sum_{i=1}^M c_i (t - t_p)^i + d_1 \cdot \log \left( (t - t_f) + \frac{1}{(t_p - t_f)} \right) + d_2 \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t^n}{\beta}} \right)$$

onde  $a_i$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $c_i$ ,  $d_1$  e  $d_2$  são coeficientes e  $N$  e  $M$  o grau dos polinómios relativos aos efeitos do nível e do tempo, estabelecidos com base em critérios físicos. Em  $E_t(t)$  o termo logarítmico representa o efeito da fluência devido às acções permanentes e o termo exponencial traduz o efeito de eventuais expansões do betão.

Os modelos de análise estrutural utilizados baseiam-se nas equações da mecânica, sendo a sua solução obtida numericamente, em regra através do método dos elementos finitos. Estes modelos incorporam um conjunto de hipóteses simplificativas relacionadas com as acções, as propriedades dos materiais e o comportamento estrutural, as quais permitem, actualmente, representar suficientemente bem o comportamento das obras em condições de exploração normal, mesmo quando sujeitas a processos de deterioração (Batista, A.L., 1998; Oliveira, S. B., 2000; Batista, A. L., *et al*, 2001).

Uma vez calibrados com as respostas observadas num determinado período, estes modelos conduzem a estimativas adequadas dessas respostas num período seguinte.

A definição de limites de validação das grandezas, uma vez que as acções da água são conhecidas, e admitindo que os erros dos próprios modelos são de segunda ordem de grandeza, é feita tendo em conta a variabilidade das acções térmicas<sup>10</sup>, das acções decorrentes

<sup>10</sup> No caso de os modelos considerarem valores das temperaturas no corpo das estruturas, observadas no período de calibração em termómetros instalados em pontos que representem o comportamento térmico global, a variabilidade da acção térmica pode ser, em princípio, desprezada.

de eventuais processos de deterioração e das propriedades reológicas dos materiais. A dispersão inerente a estas variáveis é introduzida na análise, sendo definidas através de funções de transferência adequadas as faixas de confiança para as respostas.

O uso integrado dos dois tipos de modelos conduz, em regra, a uma acentuada melhoria na previsão da evolução das grandezas. Após a análise quantitativa dos resultados das observações, os modelos numéricos são calibrados tendo em conta estes resultados e os modelos de análise quantitativa reajustados de acordo com as comparações efectuadas. A previsão da evolução das grandezas é então feita com qualquer dos modelos.

Apresentam-se seguidamente alguns resultados relativos ao estabelecimento de modelos de previsão de deslocamentos horizontais, observados com fios de prumo na barragem de Cahora-Bassa, no rio Zambeze, em Moçambique, em cujo controlo de segurança o LNEC colaborou até 2003. Trata-se de uma abóbada de dupla curvatura com uma altura máxima acima da fundação de 166 m, e espessura variando na consola central entre 4 m e 23 m (Figura 18). O maciço de fundação é constituído, essencialmente, por um gnaisse de grande rigidez.



Figura 18 – Barragem de Cahora-Bassa, no rio Zambeze.

O comportamento do betão da barragem foi considerado viscoelástico linear com maturação, tendo a sua função de fluência, para a qual se usou a lei da dupla potência de Bazant e Pannula (BaP), sido estimada a partir de ensaios de fluência dos betões da barragem e das suas composições.

$$J(t, t_0) = \frac{1}{50.0} \left( 1 + 3.0(t_0^{-0.34} + 0.042)(t - t_0)^{0.18} \right) \quad (\text{GPa}^{-1})$$

Os betões desta barragem têm elevada fluência e conseqüentemente boa capacidade de relaxação de tensões devidas a deformações impostas (Batista, A. L., *et al*, 2002).

Na previsão da evolução no tempo dos deslocamentos horizontais da barragem foi utilizado um extenso período de calibração dos modelos estatísticos e numéricos, entre 1975 e 1999,

cujos resultados permitiram o estabelecimento de faixas de confiança para o período posterior.

No modelo de elementos finitos utilizado para representar a barragem (Figura 19) o betão foi considerado homogéneo e isotrópico, com comportamento reológico definido pela expressão anterior e coeficiente de Poisson,  $\nu_b = 0,2$ .

A fundação foi considerada elástica, homogénea e isotrópica, tendo a sua deformabilidade sido representada por apoios elásticos de Vogt, calculados para  $E_f=50$  GPa e  $\nu_f=0,2$ .

A acção do peso próprio ( $\gamma_b=24$  kN/m<sup>3</sup>) da barragem foi considerada admitindo a colocação do betão em 29 camadas com intervalos mensais e a pressão hidrostática foi representada discretizando as variações do nível ao longo do tempo em 24 patamares de carga.

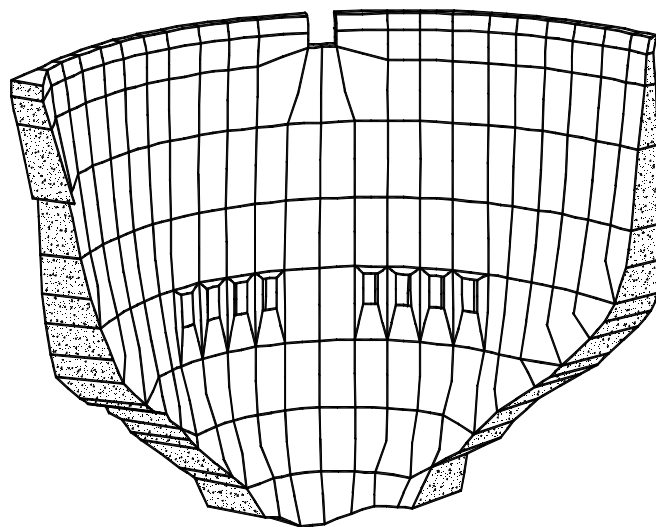


Figura 19 – Barragem de Cahora-Bassa. Modelo de elementos finitos

No betão da barragem de Cahora-Bassa foi identificado, há mais de uma década, um processo expansivo devido a reacções álcali-agregado. Para uma correcta avaliação da influência das expansões, e embora a sua distribuição no corpo da barragem apresente alguma homogeneidade, foi estabelecido um zonamento e a respectiva evolução para cada zona, a partir dos valores observados em extensómetros correctores, em nivelamentos de precisão e tendo em conta os resultados de análises químicas e petrográficas. Teve-se ainda em conta a influência do estado de tensão no desenvolvimento das expansões. Inversamente, possíveis alterações reológicas devidas à micro-fissuração do betão resultante das reacções não foram consideradas, por as expansões serem ainda moderadas.

Na Figura 20 apresentam-se os deslocamentos radiais calculados ao longo do período de calibração, para um ponto da consola central da barragem a uma cota elevada, comparando-os com os deslocamentos observados. Representam-se separadamente os efeitos da fluência e das expansões para mostrar a importância que têm nos deslocamentos diferidos e, consequentemente, no comportamento da barragem.

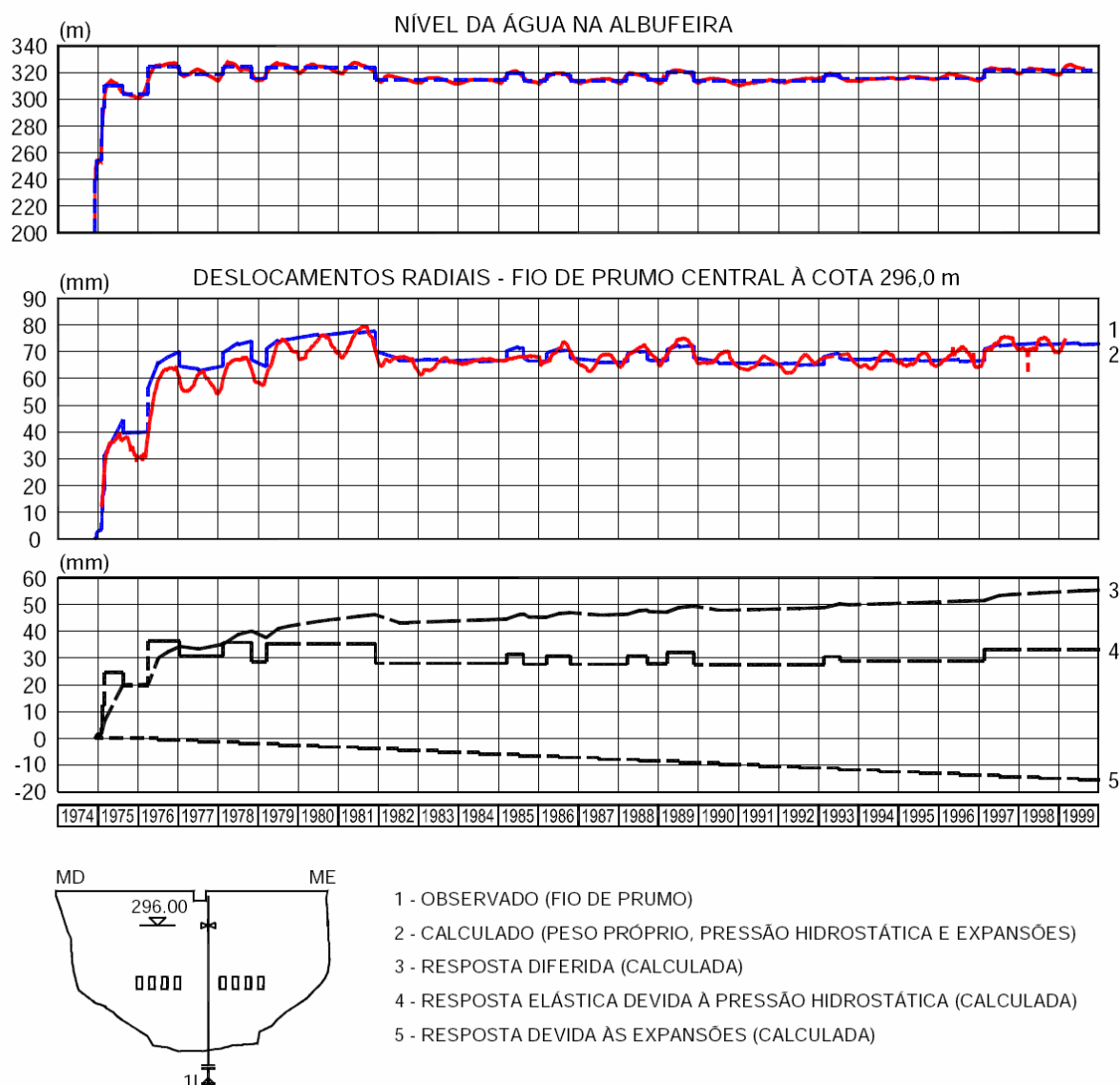


Figura 20 – Barragem de Cahora-Bassa. Deslocamentos radiais, calculados pelo modelo numérico e observados durante o período de calibração, num ponto da consola central situado à cota 296,0 m

Na Figura 21 apresentam-se os deslocamentos radiais calculados por modelo estatístico para o mesmo ponto, para o período de calibração e as previsões para o período seguinte.

O modelo estatístico, indicado na figura, considera, da mesma forma, os efeitos da fluência e das expansões e os seus resultados foram conjugados com os do modelo numérico.

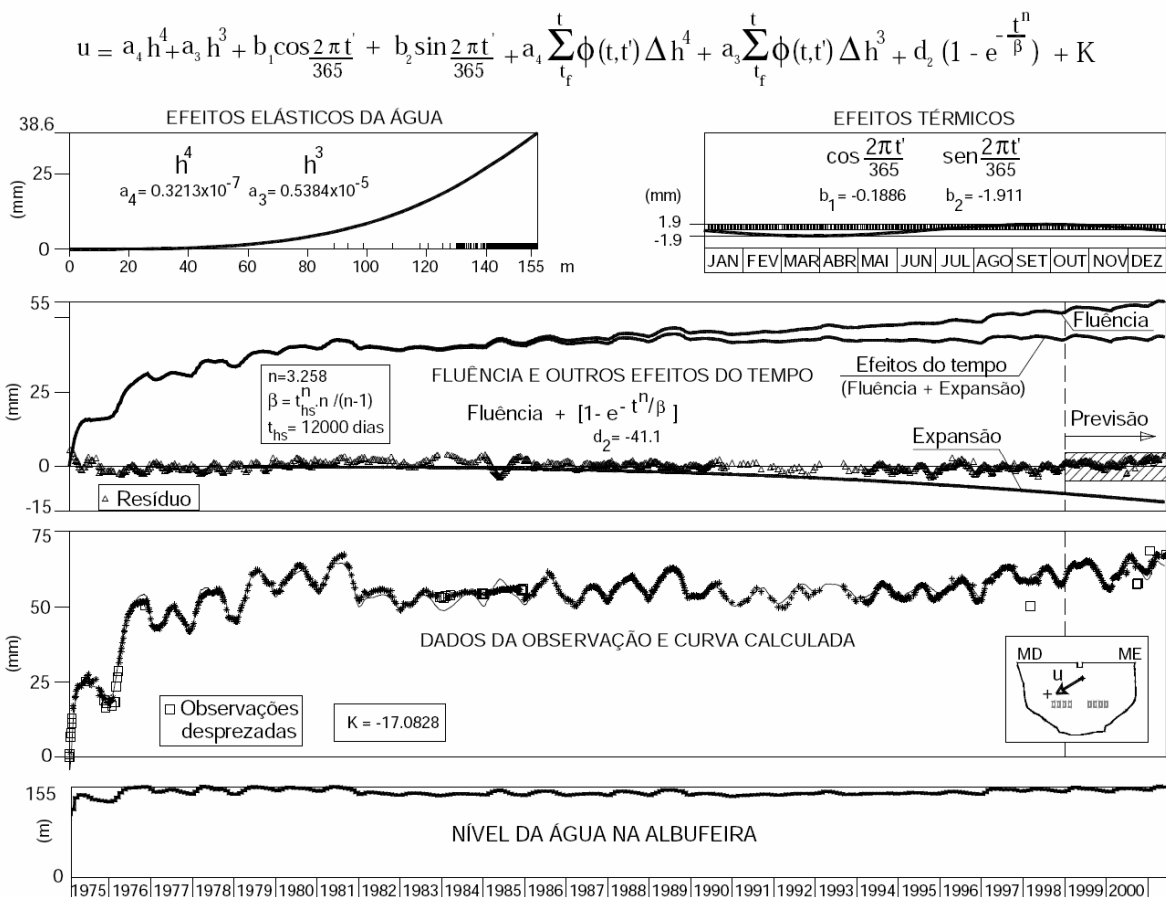


Figura 21 – Barragem de Cahora-Bassa. Deslocamentos radiais calculados pelo modelo estatístico durante o período de calibração e previstos para os dois anos seguintes num ponto da consola central situado à cota 296,0m

### Barragens de aterro

Nas barragens de aterro o estabelecimento dos limites de validação – no fundo o estabelecimento de modelos de comportamento – é talvez um pouco mais complexo.

De facto, os materiais usados na construções deste tipo de obras – solos mais ou menos finos e/ou enrocamentos – são materiais multifásicos, onde as diversas fases apresentam comportamentos muito complexos.

Desde logo, muito embora normalmente se trate estes materiais como meios contínuos eles são particulados. Assim, embora numa escala macroscópica se possa considerar como razoável a similitude a um meio contínuo, a verdade é que essas aproximações podem, em especial nos casos em que os comportamentos se aproximam dos limites, dar resultados muito pouco verosímeis.

Assim, muitas vezes, alguns dos limites de validação são estabelecidos com base no comportamento observado. Aliás, mesmo nos casos em que existem modelos de comportamento, com previsões, deve-se sempre ter alguma reserva relativamente aos resultados desses modelos. É fundamental, ao aplicar um modelo, que se conheçam os seus limites e campo de aplicação.

Finalmente, refira-se que, alguns valores limite são, evidentemente, estabelecidos pela natureza do fenómeno observado ou pela forma como é feita a medição. Por exemplo, num piezómetro hidráulico de tubo aberto, não é possível medir pressões negativas. Assim, mesmo

nos casos em que não há, à partida, modelos de comportamento muito sofisticados, é possível limitar a magnitude das leituras a obter.

### Pontes

O estabelecimento de limites de validação para os resultados da observação de pontes seguindo, de uma forma geral, os procedimentos anteriormente referidos relativamente às barragens de betão, tem naturalmente aspectos muito distintos, em função da especificidade das acções, dos materiais e das estruturas envolvidas.

Deixando de parte a acção dos sismos, pelo seu carácter específico e pontual, embora naturalmente, de grande importância, as pontes estão normalmente sujeitas a acções ambientais, como a temperatura e o vento, e a sobrecargas, que se distinguem em rodoviárias e ferroviárias. A distinção entre estes dois tipos de sobrecargas é da maior relevância, caracterizando-se a sobrecarga ferroviária por uma intensidade muito superior e pelo seu carácter discreto, pelo que o seu efeito é da maior importância nas medições efectuadas.

Nos modelos numéricos utilizados para modelar o comportamento estrutural das pontes de betão é necessário considerar o comportamento diferido dos materiais. Para este efeito, é usual utilizar, por um lado, a caracterização experimental *in situ* da fluência e da retracção do betão e, por outro lado, modelos de previsão da fluência, tendo sido usualmente utilizados os modelos do REBAP (1983), do Model Code 90 (CEB-FIP, 1991) e do EC2 (CEN, 2004).

## **CONTROLO DE SEGURANÇA EM TEMPO REAL**

Faz-se seguidamente referência a todo o processo de controlo em tempo real, com excepção da tele-transmissão de dados, hoje corrente, e dos aspectos tecnológicos relativos aos próprios equipamentos a utilizar na recolha automática, aqui fora do contexto. A este respeito, salienta-se apenas que estão hoje disponíveis no mercado sistemas de recolha automática de quase todas as grandezas correntemente utilizadas no controlo de segurança de barragens de betão.

### **Recolha automática dos dados das observações**

A recolha automática dos dados da observação, primeiro passo do controlo de segurança em tempo real, tem diversos objectivos (Mora Ramos, J, *et al*, 2003):

- um primeiro, determinante, diz respeito à melhoria do processo de controlo da segurança, inserindo-se na cadeia de acções que permitem realizá-lo em tempo real; neste contexto, a recolha automática dos dados só ganha verdadeiro interesse se associada à transmissão e validação automáticas;
- um segundo, também da maior importância, refere-se à possibilidade de recolha em obras de acesso difícil ou mesmo sem acesso durante parte do ano, particularmente por razões climáticas, ou durante ocorrências excepcionais, como sismos ou cheias;
- um terceiro, de natureza económica, respeita à relação benefício-custo da automatização, devendo para tal ser comparados os custos iniciais mais elevados dos equipamentos automáticos com as vantagens inerentes à maior quantidade de informação disponível e à redução de encargos inerentes à realização de campanhas manuais de observação;
- um quarto, refere-se à eliminação de erros de leitura dos observadores, melhorando assim a qualidade da informação;

- por último, a recolha automática pode permitir a realização de estudos que não são possíveis com a recolha manual, como, por exemplo, em barragens de betão, o estudo da influência da onda térmica diária e a realização de observações durante a noite ou com maior frequência em períodos de variação muito rápida das solicitações.

Os critérios de selecção das grandezas a observar através de recolha automática dependem de diversos factores, mas prendem-se, em regra, com a articulação do primeiro e terceiro objectivos atrás referidos, ou seja, como garantir o controlo de segurança em tempo real a custos aceitáveis.

A automatização da recolha dos dados de toda a aparelhagem instalada, para além dos custos actuais proibitivos, apresenta a desvantagem de não propiciar as inspecções de rotina, efectuadas inevitavelmente pelos observadores aquando das campanhas de recolha manual e de grande importância para a segurança das obras. Neste contexto, tem sido considerado adequado definir um certo conjunto de grandezas para recolha automática, de acordo com o tipo de obra e com os cenários de acidente que lhe estão associados.

De salientar que a automatização da recolha da informação relativa às principais acções, nomeadamente as acções da água e as variações de temperatura, é determinante para o estabelecimento de limites de validação das grandezas, sendo assim imprescindível em termos de controlo em tempo real. Nas barragens de betão, na generalidade dos casos, a automatização da recolha de temperaturas poderá respeitar apenas à temperatura ambiente. No entanto, em situações específicas, como, por exemplo, primeiros enchimentos ou reenchantos, ou ainda em certos casos de deterioração, a automatização da recolha de temperaturas no betão em pontos escolhidos, pode ser fundamental para a utilização dos modelos de previsão.

Em muitas obras, situações específicas ligadas a condições geológico-geotécnicas, critérios de projecto, ou ainda a aspectos particulares de comportamento e de deterioração, aconselharão a automatização de outras grandezas, ou outra localização para os aparelhos cuja leitura será automatizada.

Nas barragens de aterro de maior importância tem havido algumas tentativas de automatizar as medições de alguns aparelhos. Normalmente, este tipo de acções complementa as leituras tradicionais uma vez que a automatização implica a instalação de dispositivos específicos, mantendo os anteriores em funcionamento.

A automatização das medições realizadas no âmbito da observação de pontes tem sido progressiva. Tem contudo havido o cuidado de manter a realização de medições em paralelo, realizadas fundamentalmente através de aparelhos amovíveis. Para este efeito são montadas bases fixas à estrutura, nomeadamente, bases de nivelamento, clinómetro e de alongâmetro que são utilizadas no âmbito das campanhas periódicas de observação cuja manutenção é considerada essencial mesmo nas obras cujas medições sejam efectuadas integralmente de forma automática. O recurso a aparelhos amovíveis permite, de uma forma económica, a aferição das medições realizadas de forma automática, aumentando a confiança nos dados experimentais.

Segundo passo do controlo de segurança em tempo real, o tratamento automático dos dados e dos resultados das observações é, de há muito tempo e como atrás referido, feito de forma automática, em computador local ou remoto e independentemente do controlo em tempo real. Após o tratamento os dados e os resultados são validados, segundo critérios atrás expostos.



## Sistemas de apoio à decisão

Uma vez estabelecido que determinada grandeza ultrapassou os valores limite estipulados pelos modelos de previsão, deverá ser analisada a causa deste desvio. A análise requer, em princípio, a intervenção de especialistas, mas têm sido desenvolvidos recentemente sistemas que, não dispensando esta intervenção, automatizam parte da análise, contribuindo assim para a redução do tempo na tomada de decisões. Entre este tipo de ferramentas conta-se o sistema pericial SISAS, desenvolvido no LNEC (Portela, E. A., 1999).

No sistema SISAS a automatização da interpretação processa-se em duas etapas: primeiro, faz-se uma análise pormenorizada das possíveis causas do desvio entre o comportamento previsto e o observado, recorrendo-se a redes causais onde os factores intervenientes são as grandezas observadas. Desta forma é possível identificar os cenários<sup>11</sup> relacionáveis com as grandezas que se apresentam como “anormais”. Numa segunda etapa, a tarefa da análise dos cenários associados a essa “anormalidade” é realizada recorrendo-se a uma classificação de sintomas e evidências, primários e secundários, que caracterizam cada um dos cenários. Uma vez identificado(s) o(s) cenário(s) eventualmente activo(s) ou de ocorrência possível, são verificadas as possíveis soluções e são geradas as recomendações para solução ou mitigação do problema detectado. O processo está globalmente esquematizado na Figura 22.

O recurso ao mecanismo das redes causais e identificação de cenários permite a integração de conhecimentos de diversas áreas, bem como de estratégias de raciocínio diversas, a partir das relações funcionais entre os factores intervenientes. As redes procuram simular o processo de raciocínio de especialistas perante uma grandeza que ultrapassou os limites admitidos pelos modelos de previsão.

As redes desenvolvidas relacionam-se com o aumento/diminuição de subpressões, a abertura excessiva de juntas, deslizamentos horizontais e verticais excessivos de juntas, deslocamentos radiais excessivos para jusante/montante, deslocamentos tangenciais excessivos, deslocamentos verticais excessivos de empolamento/assentamento e aumento/diminuição excessivo de caudais.

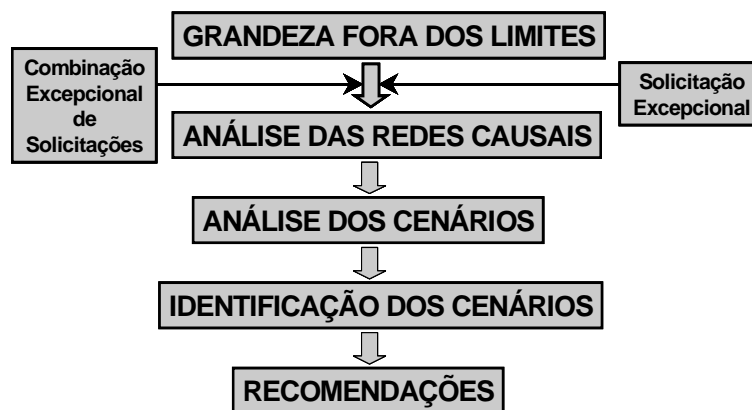


Figura 22 – Sistema SISAS

Na Figura 23 apresenta-se um exemplo de uma rede causal, relacionada com uma diminuição de caudais.

<sup>11</sup> O termo cenário é aqui utilizado num sentido mais lato do que atrás referido. Trata-se agora de um conjunto de situações passíveis de contribuir para aquela “anormalidade” e que, então, devem ser analisadas.

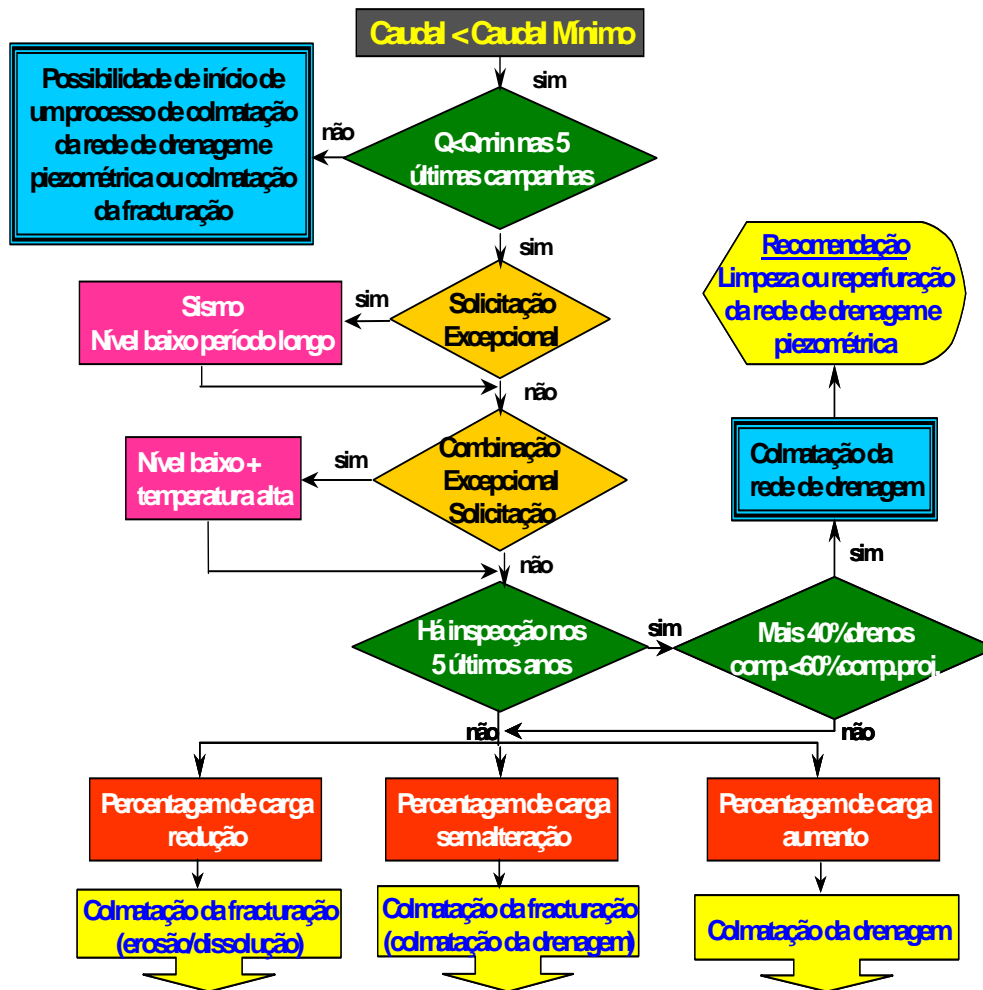


Figura 23 – Exemplo de uma rede causal

A interface do sistema pericial SISAS constitui o meio responsável pela comunicação entre o sistema e o utilizador. Através da interface o utilizador poderá interrogar o sistema, enquanto este questiona o utilizador sobre a informação ainda não disponível necessária ao processamento; é também através da interface que o sistema apresenta os seus resultados, as suas conclusões e as suas recomendações, e que o utilizador solicita explicações sobre os resultados encontrados.

O exemplo que se segue ilustra a ocorrência de um cenário de colmatção da cortina de drenagem, que foi identificado na barragem de Vilarinho da Furnas, através de anomalias detectadas nos valores das grandezas observadas. O controlo da eficiência do sistema de drenagem é feito através da medição dos caudais debitados pelos drenos e das subpressões dos piezómetros. A progressiva colmatção dos drenos conduz à redução da capacidade de drenagem podendo ter como consequência um aumento das subpressões.

Neste exemplo, o sistema identifica inicialmente uma tendência de redução dos caudais ao longo do tempo (Figura 24) a qual é acompanhada por um aumento nos valores das subpressões observadas (Figura 25), não sendo registados quaisquer valores anómalos nos deslocamentos observados por fios de prumo (Figura 26), nem nos deslocamentos relativos entre os blocos (Figura 27). Também os resultados das inspeções visuais à obra mais recentes não indicam outras anomalias (Figura 28).

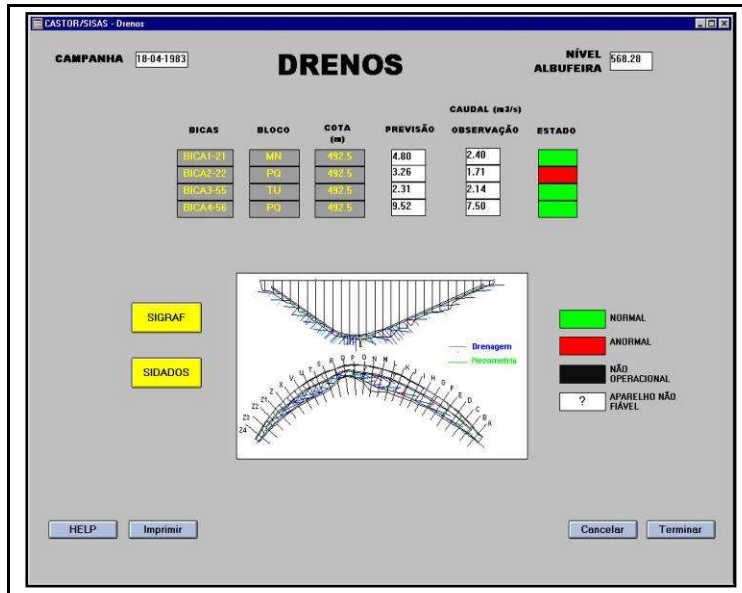


Figura 24 – Resultados dos drenos

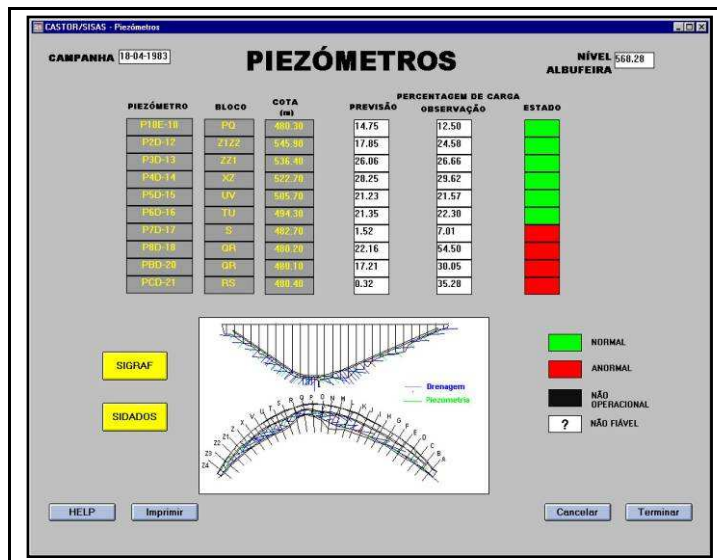


Figura 25 – Resultados dos piezómetros

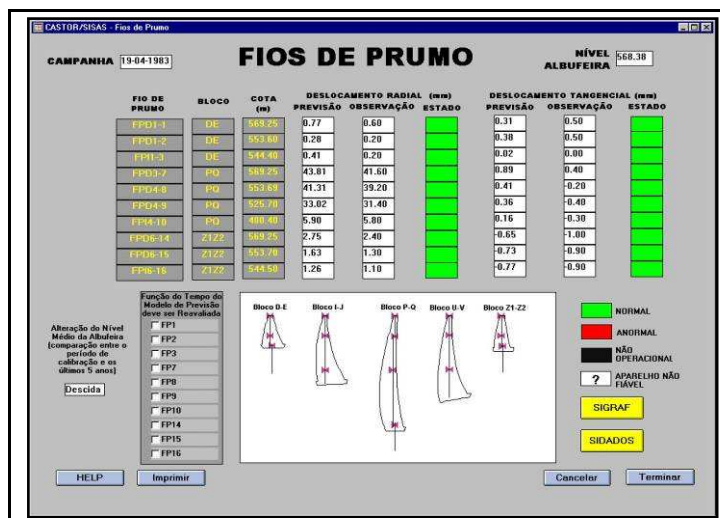


Figura 26 – Resultados dos fios de prumo

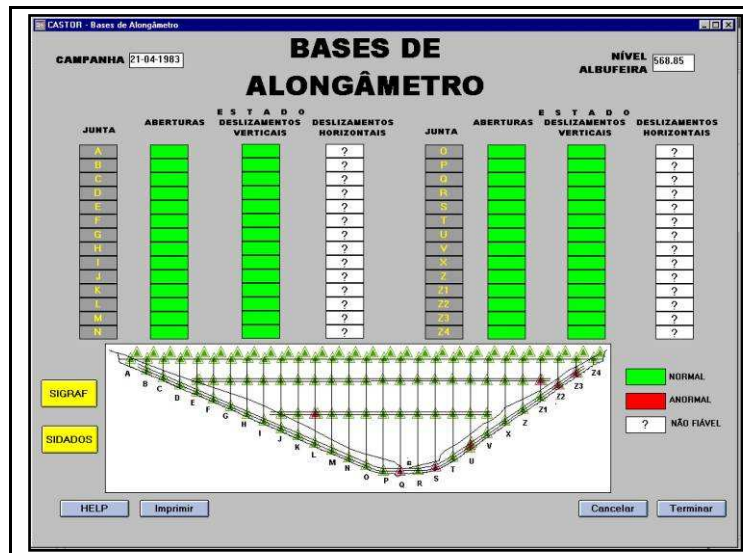


Figura 27 – Resultados das bases de alongômetro



Figura 28 – Resultados das inspeções visuais

A partir desta informação, acrescida do conhecimento armazenado no sistema sobre as características gerais da obra (materiais, geologia/geotecnia, características dos sistemas de impermeabilização e drenagem, características da água da albufeira e da água drenada, etc.), o sistema apresenta o cenário de colmatção da drenagem como possivelmente activo (Figura 29). Os principais sintomas e evidências que suportam a identificação deste cenário são então apresentados, a que se segue um conjunto de recomendações (Figura 30 e Figura 31).



Figura 29 – Cenários identificados



Figura 30 – Recomendações do cenário



Figura 31 – Recomendações globais

## REFERÊNCIAS

- Aktan, A.Emin; Catbas, F.Necati; Grimmelsman, Kirk A.; Pervizpour, Mesut, 2003 – Development of a Model Health Monitoring Guide for Major Bridges, Drexel Intelligent Infrastructure and Transportation Safety Institute, Philadelphia, USA, July, 2003, <http://www.di3.drexel.edu>.
- Arantes, E. R.; Pedro, J. O., 1993 – Perspectivas da investigação programada no LNEC (LNEC research program 1992-95). Memória LNEC. LNEC, Lisboa.
- Batista, A. L., 1998 – Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada. Tese de doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- Batista, A.L., Ramos, J.M., 2001 – “Structural analysis of swelling processes in arch dams”. 6<sup>th</sup> Int. Conf. on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and other Quasi-Brittle Materials (ConCreep-6), Boston.
- Batista, A. L.; Ramos, J.M.; Oliveira, S.B.; Gomes, J.P. (2002) – “Models for Safety Control of Concrete Dams”. 3<sup>rd</sup> International Conference on Dam Engineering, Singapura.
- Braga, L., 2000 – Extensões e tensões observadas em barragens de betão. Tese de mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- CEB-FIP, 1991 – Model Code 1990 - Design code. Thomas Telford.
- CEB-FIP (1998) – Strategies for Testing and Assessment of Concrete Structures, Bulletin 243.
- CEN, 2004 – Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings , EN 1992-1-1:2004.
- CSOPT, 1990 – Regulamento de Segurança de Barragens. Normas de Observação e Inspeção. Lisboa, Diário da República.
- Gomes, A. F. S. 1981 – Automatização das actividades de observação de barragens e análise quantitativa de resultados. Tese para especialista, LNEC, Lisboa.
- ICOLD, 1988 – Dam design criteria. The philosophy of their selection. Bulletin 61, Paris, ICOLD.
- Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D. (1992) - “Geotechnical Engineering of Embankment Dams” Balkema. Rotterdam
- FIB (2003) – Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures, Bulletin 22.
- Marcelino, J. (1986) - Observação de barragens de aterro. Automatização do tratamento da informação. LNEC, Relatório 200/86-NF, Proc. 53/13/8481, Lisboa, Julho de 1986
- Marcelino, J. (2007) – Plano de observação da barragem do Pinhão. LNEC, Relatório 137/07-DG/NBOA, Lisboa, Abril de 2007.
- Marecos, V. – Controlo da Segurança de Pontes em Tempo Real, Tese de Mestrado, IST, Lisboa, Portugal, 2007.
- Marecos, V.M., Santos, L.O. & Branco, F.A., 2006 - “Data Processing for Safety Control of Bridges in Real Time”. Proceedings of the Third international Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS’06, Porto.

- Mora Ramos, J. – Observação do comportamento estrutural de barragens de betão. Aspectos práticos. NS 96, Lisboa, LNEC.
- Mora Ramos, J.; Portela, E. A.; Batista, A. L., 2003 – Controlo de segurança de barragens de betão em tempo real. ITB 28, Lisboa, LNEC.
- Pedro, J. O., 1999 – Observação de Obras. Memória LNEC nº 821. LNEC, Lisboa.
- Portela, E. A., 2001 – Novas metodologias de apoio ao controlo de segurança de barragens de betão. Uma abordagem através de sistemas periciais. Tese de doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa.
- Portela, E. A., 2007 – “Monitoring and assessment of structures: computational tolls and techniques issues”. 5<sup>th</sup> International Conference on Dam Engineering, Lisbon.
- REBAP, 1983 – Regulamento de Estruturas de Betão Armado e Pré-Esforçado, Decreto-Lei nº 349-C/83, INCM.
- Rocha, M.; Serafim, J. L.; Silveira, A. F.; Rodrigues, O. V., 1956 – The observation of the behaviour of the Portuguese concrete dams. Lisboa, LNEC.
- Oliveira, S. B., 2000 – Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano. Tese de doutoramento. Universidade do Porto.
- Pedro, J. O. (2000) – Segurança estrutural, hidráulico-operacional e ambiental das barragens. Memória nº 824, LNEC, Lisboa.
- Pedro, J. O., 1978 – Dimensionamento de barragens abóbada pelo método dos elementos finitos. Memória nº 479, LNEC, Lisboa.