

INSPECÇÃO DE SEGURANÇA ÀS BARRAGENS DE MASSINGIR, CORUMANA, PEQUENOS LIBOMBOS E MACARRETANE

João Marcelino Silva ^{*1}, João Candeias Portugal ¹, Olinda Sousa ²

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Geotecnia - Lisboa, Portugal

²Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul) - Maputo, Moçambique,

*Email: marcelino@lnec.pt

RESUMO: A ARA-Sul lançou em 2009 um concurso para a obtenção de propostas para a realização do controlo de segurança das grandes barragens a seu cargo. O LNEC, em conjunto com a CONSULTEC, venceu o referido concurso, tendo proposto uma metodologia de colaboração adequada aos objectivos da ARA-Sul. As tarefas desenvolvidas incluem a consulta dos elementos de projecto, dos dados de observação existentes, a realização de inspecções visuais com equipas multidisciplinares, o estabelecimento de modelos de comportamento, a formação fundamentada, de um juízo sobre a segurança das obras e a preparação de repositórios de armazenamento da informação, baseadas em soluções abertas e gratuitas. A comunicação apresenta os aspectos mais relevantes das tarefas indicadas, dando-se especial detalhe à determinação de modelos de comportamento para serem inseridos no sistema de observação das diversas barragens.

1. INTRODUÇÃO

A oportunidade deste artigo decorre do contrato celebrado entre a Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul) de Moçambique e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) de Portugal para a avaliação da segurança das Barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane. Nesse âmbito, incluiu-se um plano de trabalhos abrangente, em que foram realizados, entre outros e para cada uma das obras, os seguintes trabalhos: i) consulta da documentação existente sobre o projecto e relatórios de comportamento; ii) inspecções visuais de especialidade; iii) realização de campanhas de leitura dos dispositivos de observação e diagnóstico do respectivo estado de operacionalidade; iv) verificação dos procedimentos de leitura, validação e armazenamento de dados; v) revisão dos planos de observação das obras; vi) estabelecimento de modelos de análise dos resultados da observação e, vii) elaboração de manuais de procedimentos básicos para a supervisão, controle e o acompanhamento do comportamento das barragens, tendo por base os resultados da observação. As actividades acima indicadas foram realizadas para as 4 barragens, tendo as visitas de inspecção às barragens decorrido em Abril de 2010, envolvendo uma equipa multidisciplinar que incluía especialistas de geotecnia, hidráulica e mecânica.

Neste artigo é apresentada a metodologia adoptada para o estabelecimento dos modelos de análise de comportamento das obras. Assim, e para além da presente introdução, na secção 2 apresenta-se a formulação matemática relativa aos modelos de comportamento de barragens. A secção 3 especifica os critérios de validação dos dados e dos resultados da observação. Em seguida (4) descreve-se o sistema de arquivo de dados e de exploração de resultados, e, finalmente (5) apresentam-se as considerações finais.

Para além deste, nos anais deste Congresso, são publicados mais 3 artigos, especificamente dedicados a cada uma das 3 barragens de aterro em causa, a saber, as barragens de Massingir, Corumana e Pequenos Libombos. Em cada um deles é particularizado o trabalho

desenvolvido para cada uma das obras, incluindo a respectiva descrição, a revisão dos sistemas de observação, a análise à funcionalidade dos sistemas de observação instalados e, o estabelecimento de modelos de análise de comportamento.

2. MODELOS DE COMPORTAMENTO DE BARRAGENS

2.1. Generalidades

A elaboração de um juízo de valor sobre a segurança das obras deve ser feita pela comparação entre o comportamento real (observado) e o comportamento esperado, normalmente estabelecido através de modelos. Os modelos usados nas comparações, em certos casos, podem ser do tipo conceptual ou ter um cariz matemático. De acordo com Oliveira (2000), a análise da segurança pode ser feita através de:

- modelos analíticos, aplicáveis a casos muito simples, onde é possível obter a solução das equações fundamentais da mecânica;
- modelos experimentais, aplicados em situações muito específicas, normalmente nos casos de maior complexidade, por exemplo, no que respeita à resposta dos materiais;
- modelos numéricos, quando as equações que definem o comportamento da barragem, normalmente de grande complexidade, são resolvidas por métodos numéricos, por exemplo pelo método dos elementos finitos (m.e.f.);
- modelos semi-empíricos, em que as relações entre as acções e as respostas são estabelecidas de forma mais ou menos simplificada, sem recorrer às equações da Mecânica mas incorporando, normalmente, dados da observação da própria obra.

Naturalmente que as diferentes abordagens indicadas para estabelecer modelos de comportamento têm campos de aplicação e custos distintos, devendo, em geral, ser considerados como complementares.

No caso das barragens da ARA-Sul, atendendo ao tipo de barragens e aos cenários de deterioração que têm sido identificados em obras análogas, os modelos de comportamento a utilizar para análise e avaliação das condições de segurança podem ser do tipo numérico ou semi-empírico. Porém, para o primeiro tipo, a informação necessária para alimentar os modelos reológicos incorporados, por exemplo, nos programas baseados no método dos elementos finitos, não está totalmente disponível. Com efeito, apesar de existirem resultados de ensaios, quer de campo, quer de laboratório, realizados durante a fase construtiva, esses resultados não abrangem a totalidade dos materiais que incorporam os perfis das diversas barragens. Exceptua-se o caso da barragem de Massingir, onde os dados disponíveis relativamente à caracterização dos materiais e relativamente à observação permitem, dentro de algumas hipóteses, o estabelecimento de modelos matemáticos, nomeadamente de escoamento, baseados no m.e.f.. Essas soluções são, todavia, limitadas, na medida em que é necessário considerar algumas simplificações no que respeita quer à fundação quer a alguns dos materiais que incorporam as diversas secções da barragem. Assim, e tendo em consideração os fins em vista, julga-se ser mais importante a preparação de modelos do tipo conceptual e do tipo estatístico.

Para os primeiros, procura-se conjugar factores de vária ordem, que se consideram relevantes para verificar a segurança e que, em regra, não são susceptíveis de incorporação em modelos matemáticos (como por exemplo, de análise numérica).

No caso dos modelos estatísticos, recorre-se aos dados de observação dos aparelhos instalados. Sobre esses dados é inicialmente feita uma análise sobre a sua verosimilhança, a

que se segue uma validação, eventual eliminação de leituras anómalas e, posteriormente, o teste do ajuste a diferentes modelos. Para cada aparelho em que seja possível estabelecer um modelo, são indicadas as respectivas condições de validade e a forma de quantificar os níveis de segurança para as campanhas de observação a efectuar no futuro. Foi esta a metodologia adoptada neste trabalho.

Os parágrafos seguintes apresentam as bases de formulação matemática e/ou quando aplicável, os conceitos subjacentes a cada tipo de modelos.

2.2. Modelos conceptuais

Os modelos conceptuais consistem, essencialmente, no estabelecimento da resposta esperada para a a barragem, com base na consideração conjunta e empírica dos aspectos relativos à sua concepção com os do comportamento exibido por obras semelhantes.

Exemplos típicos deste tipo de modelos, são, por exemplo, o estabelecimento do valor dos assentamentos máximos em função da altura da barragem ou o estabelecimento de relações entre as grandezas lidas por diversos equipamentos.

Os modelos conceptuais, não são, normalmente, expressos por relações matemáticas, mas antes por regras de interpretação de grandezas. Por vezes, podem também ser estabelecidas algumas relações matemáticas simples. Por exemplo, no caso de haver piezómetros na fundação, é sabido que a carga diminui de montante para jusante. É conhecida a carga a montante (a carga correspondente à albufeira) e a de jusante (normalmente assume-se que a carga é nula, isto é, que o nível freático a jusante está à superfície do terreno). Assim, é simples estabelecer as ordens de grandeza entre os piezómetros na fundação. Outro exemplo de modelos conceptuais aplica-se, por exemplo, aos piezómetros acima dos tapetes drenantes. Em condições normais de funcionamento deste importante órgão das barragens, não pode ocorrer qualquer pressão.

As variações de pressão nos piezómetros estão associadas às variações de níveis de água a montante e, caso se aplique, a jusante. Assim, variações bruscas de pressões nos piezómetros, por exemplo, descidas de pressão que não estejam associadas às variações daqueles níveis, podem querer significar uma variação brusca no funcionamento hidráulico a jusante desse aparelho, podendo, por exemplo, assinalar uma rotura no aterro ou um lavagem do filtro. De igual forma, uma variação súbita de caudal – aumento – pode ter o mesmo significado. A conjunção das duas situações é, quase certamente, sintoma de uma deficiência grave. A redução dos caudais, normalmente mais lenta, pode significar uma obstrução progressiva de elementos de drenagem. Nestes casos, ocorrem, por vezes, aumentos das pressões a montante desses elementos de drenagem. Entre outros casos, estas situações podem ocorrer nas redes de drenagem das fundações. No caso de se tratar da fundação de peças em betão, tais como descarregadores, isso poderá causar problemas de equilíbrio (estabilidade) da estrutura.

Através dos exemplos apresentados, de carácter geral, é fácil entender que os modelos conceptuais são fortemente dependentes da experiência de quem os formula. Por outro lado, este tipo de modelos acaba por estar sempre presente nas análises de comportamento, como complemento essencial na interpretação dos resultados da respectiva observação.

2.3. Modelos matemáticos

2.3.1. Modelos baseados no m.e.f.

O método dos elementos finitos (m.e.f.) foi uma das ferramentas que mais desenvolvimento conheceu desde a década de 70. Para isso contribuiu, por um lado, o aumento muito significativo da capacidade de cálculo dos computadores e, por outro, a necessidade sentida de desenvolvimento de aplicações mais potentes e complexas que permitissem a realização de cálculos mais detalhados que os associados às aplicações mais antigas. Tal como o método das diferenças finitas o m.e.f. consiste essencialmente numa ferramenta de análise numérica, que permite a determinação de soluções para as equações diferenciais que regem um determinado problema físico.

Os problemas geotécnicos e destes, em particular, os que se referem ao comportamento de barragens, são campos de aplicação privilegiados deste tipo de métodos, tendo em atenção quer a complexidade dos materiais, essencialmente trifásicos, quer a complexidade dos fenómenos a modelar, incluindo efeitos como a construção, a percolação, as acções sísmicas, a consolidação e a fluência. Mais recentemente, procede-se também à incorporação dos efeitos das variações de humidade ambiental no comportamento a longo prazo de alguns materiais (Cardoso et al, 2011).

Um dos conceitos base do método consiste na divisão da estrutura em pequenas porções — elementos finitos — nos quais se processa a aproximação da equação diferencial a funções simples e conhecidas, normalmente polinomiais. A junção dos diversos elementos permite reconstituir a estrutura em análise. A junção dos elementos é feita em determinados pontos — pontos nodais — nos quais se determinam, de forma numérica aproximada, os resultados da resolução das equações diferenciais. As incógnitas do problema, podem ser, consoante a análise em causa, os deslocamentos, no caso de análises tensão-deformação, os potenciais, no caso da análise de escoamentos, ou outras grandezas físicas, como tensões ou velocidades de escoamento que podem ser derivadas das primeiras. O objectivo de dividir o meio em pequenas porções é o de tratar cada uma dessas porções separadamente. De facto, é fácil formular um conjunto de expressões que nos permite conhecer a distribuição de deslocamentos nos pontos nodais (ou simplesmente nós) de um elemento quando se aplicam forças nos seus nós. Ou, ao contrário, conhecer as forças que se instalam num elemento finito quando se aplicam deslocamentos em qualquer dos seus nós. Esta última relação é habitualmente conhecida como matriz de rigidez, enquanto que a anterior é conhecida como matriz de flexibilidade.

Nas secções seguintes apresenta-se a formulação na qual se baseia o m.e.f. para a análise de problemas de escoamento em meios porosos e para a análise de problemas de tensão-deformação.

Cálculos de percolação

Muito embora o comportamento dos meios porosos como os solos, seja resultado, conjuntamente, da interacção das diversas fases presentes: esqueleto sólido, água e ar, é habitual, nos casos mais simples, considerar o fenómeno de escoamento de forma independente do de comportamento mecânico. Os fenómenos de escoamento em meios porosos, excluindo, portanto, a componente de comportamento mecânico, podem ser expressos através de uma equação diferencial da forma:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) + \bar{Q} = c \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

Esta equação pressupõe que o escoamento é contínuo e irrotacional, o fluido é homogêneo e incompressível, não existe capilaridade e as velocidades de escoamento são baixas. A equação acima traduz os fenômenos de escoamentos em meios porosos ou os fenômenos de transmissão de calor. Consoante o fenômeno em causa, os termos da equação assumem o significado constante no Quadro 1.

Quadro 1 – Significado dos termos da equação de escoamento consoante o fenómeno em causa

Variável	Escoamento em meios porosos (percolação)	Transmissão de calor (difusão térmica)
H	Potencial	Temperatura
k	Coefficiente(s) de permeabilidade	Coefficiente(s) de condutividade térmica
Q	Caudal (fluxo)	Fluxo de calor
c	Porosidade do meio	Calor específico

No que respeita ao tratamento matemático os fenômenos são iguais. No que respeita ao fenómeno físico há apenas semelhanças formais.

Admitindo que o escoamento é plano, não há variação do potencial no plano perpendicular ao da análise tendo-se $\frac{\partial H}{\partial z} = 0$ e, conseqüentemente, $\frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial H}{\partial z} \right) = 0$. Adicionalmente, no estudo do escoamento em meios porosos em regime permanente, não há variação do potencial com o tempo, tendo-se também $c \frac{\partial H}{\partial t} = 0$.

O conceito de potencial — H — empregue nas equações anteriores compreende a soma de dois termos. O primeiro, devido à posição da partícula de água e o segundo devido à pressão instalada no ponto onde se situa essa partícula. Na Fig. 1 representa-se graficamente, num exemplo simples, o conceito de potencial. Os pontos 1 e 2, encontram-se numa linha equipotencial, que representa o lugar geométrico de todos os pontos com o mesmo potencial. Em cada um dos pontos assinalados na figura está colocado um piezómetro e indicada a altura de água (uma medida de pressão) dentro do tubo piezométrico.

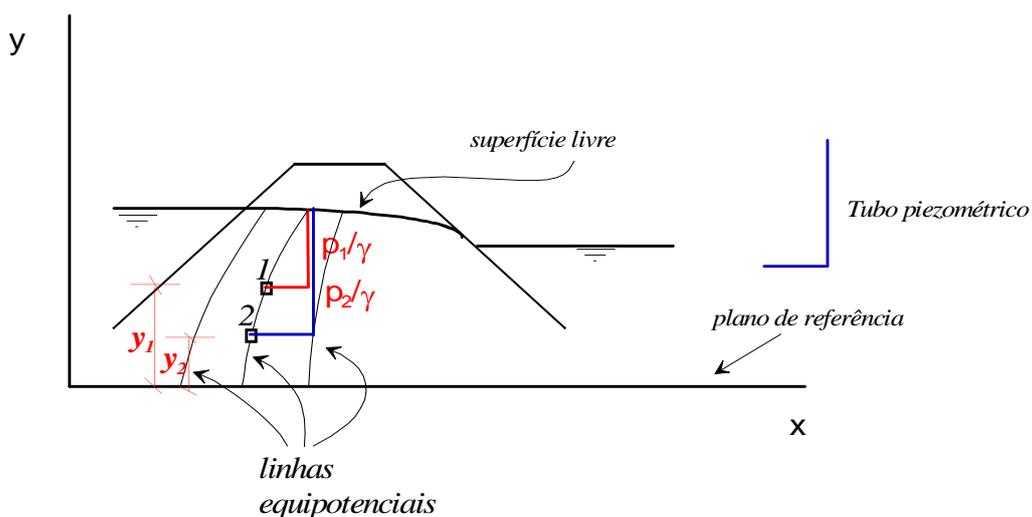


Fig 1. Definição de potencial

O ponto 1 tem o potencial:

$$H_1 = y_1 + \frac{p_1}{\gamma} \quad (2)$$

enquanto que o ponto 2, tem o potencial:

$$H_2 = y_2 + \frac{p_2}{\gamma} \quad (3)$$

Ora como os pontos se encontram sobre a mesma linha equipotencial, tem-se que $H_1=H_2$. Como ressalta da figura, $y_1 > y_2$, pelo que tem obrigatoriamente que ser $p_2 > p_1$. Em cada linha equipotencial a soma do potencial de posição (tipicamente, a cota) com o potencial de pressão (o valor da pressão dividido pelo peso volúmico do fluido) tem um valor constante. É a definição de equipotencial.

No estudo de percolação, formulado como se indica, na equação expressa em termos dos potenciais, o potencial é uma grandeza primária. Mas na análise dos escoamentos interessa também conhecer o valor de outras grandezas. A pressão deriva da própria definição de potencial. Assim, consoante a definição de pressão pretendida ter-se-á:

$\frac{p}{\gamma} = H - y$, sendo a pressão expressa em unidades de comprimento (por exemplo em metros de coluna de água) ou;

$p = \gamma (H - y)$, sendo, neste caso, a pressão expressa em força por unidade de área.

Outra grandeza secundária da maior importância, habitualmente necessária nas análises dos resultados, é a velocidade do escoamento. Consoante a lei de escoamento adoptada, pode-se calcular a velocidade do escoamento a partir do potencial. Assim, em geral, e de acordo com a Lei de Darcy, ter-se-á:

$$v = -k i \quad (4)$$

onde k é o coeficiente de permeabilidade e i o gradiente. Tem-se, no caso unidimensional,

$$i = \frac{\partial H}{\partial x} \quad (5)$$

Considerando o escoamento tridimensional, o vector velocidade pode ser decomposto segundo três componentes, tendo-se a lei de Darcy generalizada:

$$v_i = -\sum_j k_{ij} \frac{\partial H}{\partial x_j} \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (6)$$

A lei de Darcy relaciona a velocidade aparente de escoamento com o gradiente hidráulico (i), e uma constante de proporcionalidade k :

$$v = -k i \quad (7) \text{ bis}$$

Essa constante de proporcionalidade (positiva) é o coeficiente de permeabilidade e representa uma medida directa da maior ou menor facilidade que o fluido tem para atravessar o meio poroso. Por outro lado, a velocidade a que se refere a lei de Darcy não representa a velocidade de uma dada partícula de água no meio poroso. De facto, atendendo à natureza do meio atravessado a velocidade de escoamento tem um carácter pontual, isto é, varia de ponto para ponto, numa mesma secção "s" (Fig. 2). A lei de Darcy refere-se à média das velocidades dos pontos numa mesma secção. Tem, por isso, um carácter estatístico. A velocidade aparente de escoamento também pode ser designada por velocidade de Darcy. A validade da lei pressupõe

um regime laminar o que pode ser inválido, num dado ponto, mas é, em média, válido numa secção. A lei de Darcy é válida, de uma forma geral, para materiais finos e para escoamentos com gradientes baixos. No caso de materiais mais grosseiros (por exemplo, enrocamentos) o escoamento pode ser regido por leis não lineares.

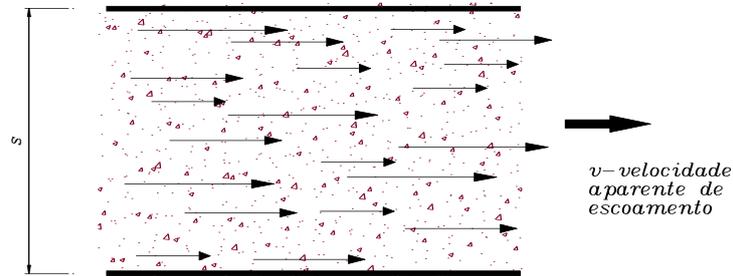


Fig 2. Velocidades reais e aparente de escoamento

Cálculos tensão-deformação

Para formular as equações que permitem resolver o problema da análise tensão-deformação pelo m.e.f. pode-se recorrer ao princípio dos trabalhos virtuais e igualar o trabalho realizado pelas forças exteriores àquele que realizam as forças interiores¹. Na Fig. 3 apresenta-se a notação das forças que actuam num elemento finito.

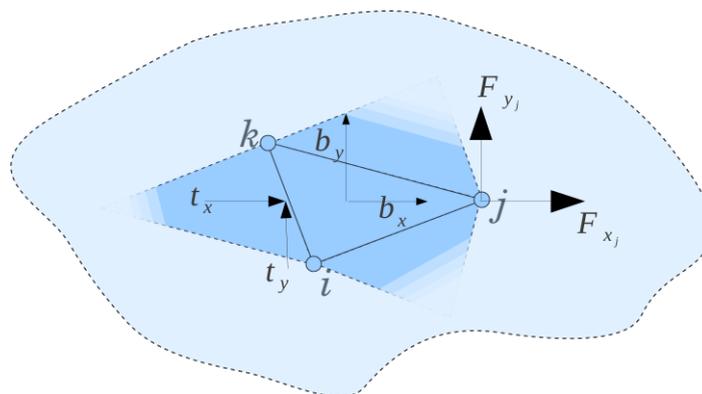


Fig 3. Convenção das forças exteriores que podem actuar num elemento finito

Seja $d\{\delta\}^e$ o deslocamento virtual nos pontos nodais de um elemento. Então as deformações virtuais resultantes serão $d\{\epsilon\} = \mathbf{B}^T d\{\delta\}^e$. Por outro lado, o campo de deslocamentos virtuais dentro do elemento é dado por: $d\{\mathbf{u}\} = \mathbf{N}^T d\{\delta\}^e$, onde \mathbf{N}^T é a matriz com as funções de interpolação dos deslocamentos nodais.

O trabalho realizado pelas forças exteriores num deslocamento virtual $d\{\delta\}^e$ é igual ao produto dessas forças pelo deslocamento resultante. As forças exteriores são as que se encontram aplicadas nos nós, as forças mássicas e as forças aplicadas na fronteira, tendo-se então²:

$$dV = \{\delta\}^e{}^T \mathbf{R}^e + \int_V \{\mathbf{u}\}^T \mathbf{b} dV + \int_\Gamma \{\mathbf{u}\}^T \mathbf{t} d\Gamma \quad (8)$$

¹ Aqui o conceito de “força” é entendido no sentido generalizado. Forças significa tensões ou forças concentradas em pontos nodais e deslocamentos significa deformações ou deslocamentos de pontos nodais.

² Os dois últimos termos da equação 7 podem, em alternativa, ser considerados como forças interiores, mas, nesse caso, o seu sinal vem trocado.

O trabalho realizado pelas forças interiores (tensões), no mesmo deslocamento virtual é:

$$dU = \int_V \{\sigma\}^T \{d\varepsilon\} dV \quad (9)$$

Igualando os trabalhos realizados pelas forças exteriores e interiores e substituindo $d\{u\}$ e $d\{\varepsilon\}$ obtém-se:

$$\{\sigma\}^T \{R\} + \int_V \{N\}^T d\{\sigma\} \{b\} dV + \int_\Gamma \{N\}^T d\{\sigma\} \{t\} d\Gamma = \int_V \{B\}^T d\{\sigma\} \{d\} dV \quad (10)$$

Como a igualdade tem de ser verdadeira qualquer que seja o deslocamento virtual tem-se:

$$\{R\} + \int_V \{N\}^T \{b\} dV + \int_\Gamma \{N\}^T \{t\} d\Gamma = \int_V \{B\}^T \{d\} dV \quad (11)$$

Substituindo na Eq. 10 o vector $\{\sigma\}$ fica:

$$\{R\} = \int_V \{B\}^T \{D\} \{B\} dV \{d\} - \int_V \{N\}^T \{b\} dV - \int_\Gamma \{N\}^T \{t\} d\Gamma \quad (12)$$

Onde :

$$\mathbf{k}_{ij}^e = \int_V \mathbf{B}_i^T \mathbf{D} \mathbf{B}_j dV \quad (13)$$

representa a matriz de rigidez de cada elemento finito

Considerando a estrutura como a junção de todos os elementos finitos tem-se, para a estrutura global:

$$\sum_j \mathbf{k}_{ij} \{d\}_j = \{R\}_i \quad (14)$$

onde,

$$\{R\}_i = \sum_e \{R\}_i^e \left(- \int_V \{N\}^T \{b\} dV - \int_\Gamma \{N\}^T \{t\} d\Gamma \right) \quad (15)$$

e,

$$\mathbf{k}_{ij} = \sum_e \mathbf{k}_{ij}^e \quad (16)$$

A resolução do sistema de equações traduzido pela Eq. 13 (ou pela Eq. 1 no caso da percolação) é feita recorrendo a programas específicos de cálculo utilizando o método dos elementos finitos. Existem diversos pacotes comerciais adequados para o efeito. No caso do presente estudo, e apenas para a barragem de Massingir, foi feito o estudo de percolação com dois programas: PlaxFlow³ e Code-Aster⁴.

2.3.2. Modelos de análise quantitativa (modelos estatísticos)

As diversas barragens da Ara-sul contam já com algumas décadas de observações contínuas e regulares, em geral com qualidade adequada para o estabelecimento de modelos de análise quantitativa (modelos semi-empíricos).

³ <http://www.plaxis.nl/shop/71/info/PlaxFlow/>

⁴ <http://www.code-aster.org/V2/spip.php?rubrique2>

A forma mais simples de estabelecer modelos de análise quantitativa consiste em procurar relacionar as variáveis do problema (tipicamente as acções ou variáveis independentes) com a resposta (ou variáveis dependentes), traduzida por deslocamentos, pressões, caudais, etc.. A relação entre os dois tipos de variáveis pode ser expressa por um conjunto de equações através de relações matemáticas, tal que, dados os valores das variáveis de *input* (variáveis independentes - x) se possa calcular os valores previstos para as variáveis de *output* (ou dependentes - y). O ajuste do modelo consiste na determinação dos parâmetros das equações que minimizam uma determinada função objectivo.

Por razões de simplicidade de tratamento matemático, convém que os coeficientes a determinar nas expressões afectem linearmente as variáveis, tal como expresso na Eq. 17.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 \psi_1(x_1) + \beta_2 \psi_2(x_2) + \dots + \beta_n \psi_n(x_n) \quad (17)$$

onde $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é a função que traduz o modelo de análise quantitativa, β_i são os parâmetros que se pretende determinar e $\psi_n(x_n)$ funções (quaisquer) de x_n , isto é, das variáveis independentes. Note-se que a premissa anterior, de linearidade, não é obrigatória, mas facilita a aplicação do método. Por outro lado, a função $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ não necessita ter qualquer significado físico, embora o possa ter.

O exemplo mais simples de modelo é o da recta de regressão linear. Nesse caso:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 \psi_1(x_1) + \beta_2 \psi_2(x_2) + \dots + \beta_n \psi_n(x_n) \rightarrow f(x) = \beta_1 + \beta_2 x \quad (18)$$

Os valores de β_i são, normalmente, determinados de forma a minimizar o quadrado da distância dos pontos à recta de regressão (neste caso, o método é conhecido pelo método dos mínimos quadrados).

A determinação dos parâmetros β_i seria trivial no caso do número de observações do vector \mathbf{y} ser igual ao número de incógnitas β_i . Assim, por exemplo, no caso de regressão linear, ter-se-ia:

$$\begin{aligned} y_1 &= \beta_1 + \beta_2 x_1 \\ y_2 &= \beta_1 + \beta_2 x_2 \end{aligned} \quad (19)$$

ou, matricialmente:

$$\mathbf{y} = \mathbf{X} \boldsymbol{\beta} \rightarrow \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{Bmatrix} \quad (20)$$

Resolvendo o sistema de equações em ordem aos coeficientes β_i , concretiza-se a expressão que define o modelo pretendido.

No caso geral, porém, o número de observações de y é (desejavelmente) muito superior ao número de parâmetros da expressão que define a lei que se pretende ajustar. Nestas condições o sistema:

$$\begin{aligned}
y_1 &= \beta_1 + \beta_2 x_1 \\
y_2 &= \beta_1 + \beta_2 x_2 \\
y_3 &= \beta_1 + \beta_2 x_3 \\
y_4 &= \beta_1 + \beta_2 x_4 \\
&\dots \\
y_n &= \beta_1 + \beta_2 x_n
\end{aligned}
\tag{21}$$

que, matricialmente se pode escrever:

$$\begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 \\ 1 & x_2 \\ 1 & x_3 \\ \dots & \dots \\ 1 & x_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{Bmatrix} \Leftrightarrow \mathbf{y} = \mathbf{K} \boldsymbol{\beta}
\tag{22}$$

não tem, naturalmente, solução, dado que a matriz dos coeficientes \mathbf{K} não é quadrada e, portanto, não possui inversa. No entanto, multiplicando ambos os termos da Eq. 21 por \mathbf{K}^T ter-se-á:

$$\mathbf{K}^T \mathbf{y} = \mathbf{K}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\beta}
\tag{23}$$

onde $\mathbf{K}^T \mathbf{K}$ é uma matriz quadrada, com inversa, pelo que se pode ainda multiplicar ambos os termos da equação por $(\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1}$, obtendo-se:

$$(\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{y} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{K} \boldsymbol{\beta}
\tag{24}$$

ou,

$$(\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{y} = [\mathbf{I}] \boldsymbol{\beta}
\tag{25}$$

onde $[\mathbf{I}]$ representa a matriz identidade. Assim, finalmente, é possível calcular o valor dos coeficientes da lei pretendida através de:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{K}^T \mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T \mathbf{y}
\tag{26}$$

onde $\boldsymbol{\beta}$ representa o vector contendo os valores de β_i , \mathbf{y} o vector das variáveis dependentes (valores observados) e \mathbf{K} a matriz com as funções $\psi(x_n)$.

Para que a aplicação deste método conduza a modelos fiáveis é necessário (mas não suficiente) que: i) haja observações em número suficiente; ii) as observações estejam isentas de erros; iii) a relação entre as variáveis independentes x_n e os valores observados y possa ser traduzida matematicamente através de expressões simples e; iv) todas as variáveis independentes relevantes para explicar a variação de uma dada grandeza estejam incluídas na expressão.

A título de exemplo, indicam-se em seguida algumas expressões que podem ser usadas nos modelos. Trata-se de expressões que são empregues com sucesso no estabelecimento de modelos deste tipo, mas não esgotam as possibilidades a considerar:

$$y = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad (27)$$

$$y = \beta_1 + \beta_2 N_{AA} + \beta_3 N_{AA}^2 \quad (28)$$

$$y = \beta_1 e^{\beta_2 N_{AA}} \quad (29)$$

$$y = \beta_1 e^{\beta_2 (t - t_0)} \quad (30)$$

onde y representa a grandeza que se pretende modelar (por exemplo uma pressão, caudal ou deslocamento), N_{AA} representa o nível de água na albufera e t, t_0 as variáveis tempo e tempo de referência, respectivamente.

As expressões 27 a 29 são adequadas, por exemplo, para modelar as respostas dos piezómetros ou dos medidores de caudais. Já a expressão 30, atendendo à sua dependência do tempo, poderá ser adequada para a modelação dos deslocamentos superficiais verticais devidos à fluência. Naturalmente que as expressões das equações 29 e 30 necessitam de uma transformação de coordenadas para que os coeficientes β_i afectem linearmente as variáveis. Assim, por exemplo, para o caso da Eq. 29:

$$y = \beta_1 e^{\beta_2 N_{AA}} \Leftrightarrow \ln y = \ln \beta_1 + \beta_2 N_{AA} \quad \forall y > 0 \quad (31)$$

A qualidade do ajuste de um dado modelo às observações pode ser avaliada, por um lado, pela comparação visual entre as medições e as previsões do modelo ou, por outro, pelo cálculo do coeficiente de correlação entre os vectores das observações e das medições. Este coeficiente (R) deverá ser superior a 0,9 para que o ajuste seja considerado satisfatório. Por vezes, e por exemplo para a validação de resultados de campanhas, podem ser aceitáveis valores um pouco mais reduzidos, mas, nesse caso, o modelo perde fiabilidade, devendo ter-se este aspecto em consideração se a ele se recorrer para a interpretação do comportamento. Por outro lado, para se poder detectar eventuais anomalias, convém analisar se as diferenças entre o modelo e as observações se mantêm mais ou menos distribuídas no tempo, ou se, pelo contrário, se verifica alguma degradação/alteração da resposta.

Os modelos de análise quantitativa ou semi-empíricos, são dinâmicos, na medida em que os coeficientes β_i podem (e devem) ser recalculados a cada nova observação (ou mais concretamente considerando um conjunto de observações). No entanto, é sempre conveniente ponderar bem a necessidade de proceder a essas alterações, dado que, essa situação pode querer traduzir algum fenómeno com implicações ao nível da segurança e as alterações no modelo poderão mascarar essas situações. Por exemplo, se for necessário alterar os coeficientes de um modelo de previsão dos caudais porque estes são, de forma sistemática, crescentes, isso pode querer significar que existem problemas nos órgãos de estanquidade. Assim, a alteração do modelo, sem se proceder a uma análise crítica cuidada das causas das alterações, pode dificultar o diagnóstico de eventuais deficiências.

Como nota final, refira-se que os modelos de análise quantitativa permitem avaliar se a resposta da obra está ou não conforme ao comportamento exibido anteriormente. Não permitem avaliar, em termos absolutos, se essa resposta é normal. Nos casos em que a prestação anterior da barragem é satisfatória, mantendo-se o mesmo tipo de comportamento, o mesmo diagnóstico pode ser mantido. Não sendo esse o caso, é necessário averiguar as causas de eventuais desvios ao comportamento previsto pelos modelos, e, então, inferir sobre quaisquer alterações que possam ter significado ao nível do diagnóstico de segurança.

3. VALIDAÇÃO DE DADOS E RESULTADOS

3.1. Generalidades

A validação dos dados relativos à observação é uma operação essencial, na medida em que se destina a garantir a respectiva qualidade e, por conseguinte, a qualidade da informação sobre a segurança das obras. As operações de validação destinam-se a detectar e corrigir os erros que podem ocorrer, quer por defeitos dos sistemas (avarias dos equipamentos ou sensores) quer por erros humanos: erros de leitura, registo, introdução de dados no sistema, etc..

A validação de dados e resultados processa-se em diversas etapas da recolha e processamento da informação. Interessa garantir, no final, a exactidão e pertinência dos dados e resultados disponíveis no sistema.

A existência, num sistema de controlo de segurança de uma obra, de dados não validados pode comprometer a utilidade desses dados e induzir em conclusões erróneas, com repercussões sobre a segurança das barragens.

Os parágrafos seguintes apresentam, de forma condensada, os níveis de validação de dados e de resultados pertinentes para o sistema de controlo de segurança das barragens e a sua implementação no presente caso.

3.2. Validação de dados

A validação dos dados destina-se a assegurar que os valores “em bruto”, isto é, sem serem afectados de qualquer cálculo, tal como medidos nos aparelhos instalados na barragem, representam correctamente as grandezas em causa. A título ilustrativo, supondo que numa escala de níveis de um medidor de caudais, os limites são 0 e 20 cm, não poderão, por exemplo, ocorrer leituras de 22 cm. A validação neste caso consiste, pois, em garantir que as leituras estão compreendidas no intervalo [0,20]. Por outro lado, em certos aparelhos, os limites físicos dos equipamentos representam extremos que traduzem, por excesso, os limites possíveis, podendo (e devendo) ser mais detalhados. Para facilitar a validação dos dados, pode-se, por exemplo, recorrer aos limites das séries de dados existentes, que em muitos casos podem representar, de forma adequada, os extremos fisicamente possíveis, tendo em consideração as condições particulares em que os equipamentos se encontram instalados e as condições de exploração da barragem. Os limites máximos e mínimos das séries históricas, nalguns casos, com mais de 20 anos, dos piezómetros de tubo aberto instalados nas barragens da ARA-Sul, constituem um bom exemplo desse tipo de situações.

Sempre que possível foi implementada a validação de dados pela conjugação destes dois aspectos: limites dos equipamentos e análise das séries históricas.

Um primeiro nível de verificações de validação deverá ser feito, desde logo, pelos operadores responsáveis pela leitura dos equipamentos. Esses elementos devem sempre levar consigo o registo da última, ou das últimas, leituras. Deverão, portanto, analisar os registos que fazem e verificar a sua compatibilidade com os registos anteriores. Em caso de dúvida deverão repetir a(s) leitura(s). É fundamental que os operadores que executam as leituras tenham perfeita consciência da tarefa que executam e estejam familiarizados com o funcionamento dos aparelhos, com a sua localização e com a relação operacional das leituras que efectuam com as grandezas em causa. Estas condições permitem uma capacidade acrescida de detectar qualquer anomalia ou leitura errónea, permitindo a sua pronta correcção. Em todo o caso, não são aceitáveis, de forma alguma, registos que não traduzam de forma fiel o que foi lido. Sempre que haja necessidade, devem ser registados os comentários referentes às dificuldades

encontradas ou às anomalias detectadas, nomeadamente valores que, após confirmação, não obedecem aos limites estabelecidos.

3.3. Validação de resultados

Após a introdução, no sistema de arquivo de dados, das leituras efectuadas nas campanhas, são feitos cálculos sobre esses valores. Normalmente esses cálculos transformam os valores lidos numa grandeza física directamente relacionável com o comportamento da barragem. Noutros casos, a própria leitura já representa a grandeza física pretendida. É exemplo deste último tipo o nível de água na albufeira, quando medido através da escala limnigráfica. O exemplo com recurso a cálculos pode também ser referente ao nível da água na albufeira, quando obtido por uma célula de pressão. Neste caso, a pressão medida, por exemplo em Pascal (Pa), deverá ser convertida para metros de coluna de água e o valor resultante deve ser acrescido da cota de instalação da célula, permitindo obter a cota do nível da água na albufeira. Outro exemplo da transformação de leituras consiste na conversão da leitura dos piezómetros de tubo aberto em cota piezométrica. Neste tipo de dispositivos a leitura consiste em medir a distância desde a boca do tubo piezométrico até à superfície da água no seu interior. Neste caso, o cálculo consiste em deduzir à cota da boca do tubo piezométrico a distância assim medida, obtendo-se a cota piezométrica.

A validação dos resultados pressupõe a existência de um modelo de interpretação/previsão do comportamento que permita verificar que, em determinada situação, é esperado um determinado valor de uma grandeza. Comparando o valor esperado (dado pelo modelo) com o valor medido poder-se-á estabelecer um juízo sobre a resposta da barragem naquele particular aspecto e, por conseguinte, integrando toda a informação, sobre a sua segurança.

Os modelos aplicáveis a este processo de validação/interpretação podem ser do tipo conceptual, tal como apresentado no §2.2 ou, desejavelmente, devem ter cariz matemático, quer sejam baseados no m.e.f. quer sejam estatísticos.

No presente caso, atendendo à quantidade de dados disponíveis, fez-se, sempre que possível, a implementação de modelos de natureza estatística. Assim, para cada aparelho, determinou-se uma relação do tipo:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \beta_1 \psi_1(x_1) + \beta_2 \psi_2(x_2) + \dots + \beta_n \psi_n(x_n) \quad (17)\text{bis}$$

em que os diferentes símbolos têm o significado explicitado na secção 2.3.2.

Para cada valor de $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ estimado pelo modelo existe um valor F medido no aparelho. Uma vez que o modelo é apenas aproximado, pode-se definir um erro associado à resposta do modelo:

$$E(x_1, x_2, \dots, x_n) = f(x_1, x_2, \dots, x_n) - F \quad (32)$$

onde x_n representa o valor da variável independente x_n no instante de tempo t .

Se a função de erro E tiver uma distribuição normal, distribuição que, em regra, descreve adequadamente a variação das observações em torno do modelo estatístico, então é possível estabelecer os intervalos a que correspondem determinados níveis de confiança. Na Fig. 4 apresenta-se, de forma esquemática, o processo de validação dos resultados da observação, tendo em consideração os modelos de comportamento. Na mesma figura apresentam-se os múltiplos do erro padrão a que correspondem determinados intervalos de confiança.

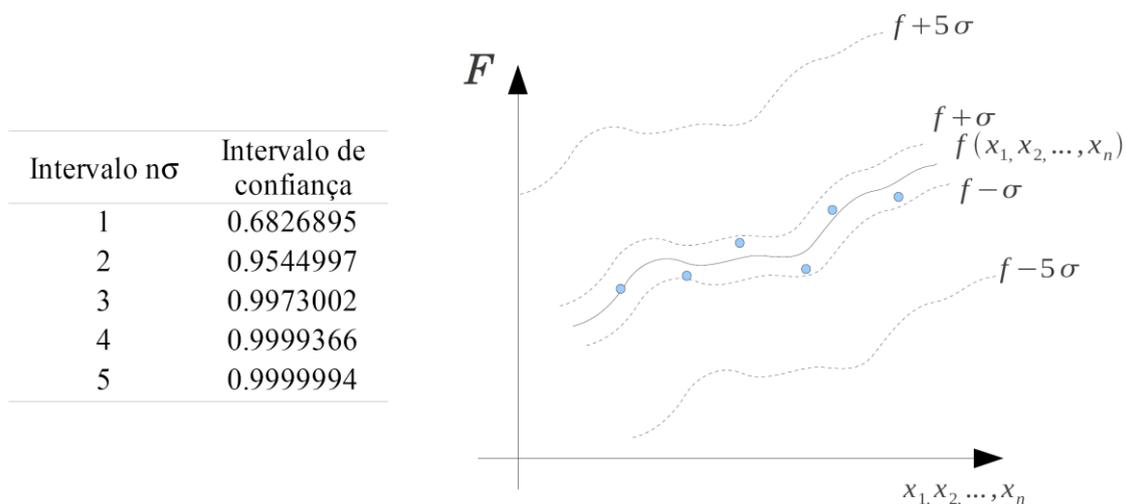


Fig 4. Intervalos de confiança em torno dos modelos de comportamento

Por outro lado, atendendo às considerações anteriores é possível estabelecer regras para definir níveis de atenção e alerta para cada aparelho, em função do desvio das leituras em relação aos modelos. No caso das barragens da ARA-Sul estabeleceram-se os critérios de atenção e alarme que se resumem no Quadro 2.

Quadro 2 – Níveis de atenção e alerta em função do desvio aos modelos

Nível	Definição	Descrição	Acção recomendada
Verde	$E \leq 2\sigma$	Comportamento normal: as leituras estão de acordo com o modelo estatístico baseado nas leituras anteriores. Cerca de 95% das leituras anteriores enquadram-se neste intervalo.	Nenhuma
Amarelo	$2\sigma \leq E \leq 5\sigma$	Há uma discrepância relevante entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	a) verificar boletins de registo b) repetir leituras c) verificar historial d) verificar necessidade de recalibração do modelo
Vermelho	$E > 5\sigma$	Há uma discrepância grosseira entre os resultados do modelo e as leituras obtidas.	a) verificar boletins de registo b) repetir leituras c) verificar historial d) verificar ocorrências noutros aparelhos e) notificar responsável pela análise de segurança

3.4. Implementação

De acordo com o conjunto de regras acima apresentadas e sempre que possível, procedeu-se à implementação dos procedimentos de validação aplicáveis a cada caso. A validação foi feita a dois níveis: a) validação de dados e, b) validação dos resultados no âmbito dos modelos. A segunda validação só é aplicável no caso de ter sido possível estabelecer um modelo com verosimilhança (ver 2.3.2). Assim, o número total de situações possíveis corresponde à combinação das seguintes hipóteses: validação de dados - 2 situações possíveis: passa na validação ou não passa na validação e; validação/teste da resposta - 3+1 situações possíveis: verde, amarelo, vermelho ou modelo não disponível. Para facilidade de organização e interpretação, atribuiu-se a cada situação um código, cujo significado se detalha em seguida:

Resultado da validação:

1. **Modelo=OK** ← a leitura introduzida verifica, simultaneamente, os critérios de validação dos dados, encontrando-se dentro da gama possível para o equipamento e/ou os limites históricos e, verifica também os critérios correspondentes aos modelos estatísticos, sendo o desvio menor que 2σ ;
2. **Modelo=?** ← a leitura introduzida verifica os critérios de validação dos dados, encontrando-se dentro da gama possível para o equipamento e/ou os limites históricos, mas apresenta um desvio superior a 2σ embora menor que 5σ ;
3. **Modelo=AL** ← a leitura introduzida verifica os critérios de validação dos dados, mas o desvio da leitura relativamente ao modelo é superior a 5σ ;
4. **Modelo=OK-Dados-?** ← a leitura introduzida não verifica os critérios de validação dos dados, mas o desvio da leitura relativamente ao modelo é inferior a 2σ (esta situação é pouco provável de acontecer);
5. **Modelo=?-Dados-?** ← a leitura introduzida não verifica os critérios de validação dos dados, e apresenta um desvio superior a 2σ embora menor que 5σ , provavelmente existe um erro de dados que condiciona a aplicação do modelo;
6. **Modelo=AL-Dados-?** ← a leitura introduzida não verifica os critérios de validação dos dados, e o desvio da leitura relativamente ao modelo é superior a 5σ , pelo que provavelmente existe um erro grosseiro nos dados;
7. **Modelo=N/D** ← a leitura introduzida verifica os critérios de validação dos dados mas não existe modelo de análise;
8. **Modelo=N/D-Dados-?** ← a leitura introduzida não verifica os critérios de validação dos dados, e não existe modelo de análise;

Com respeito às diversas hipóteses de situações de validação de dados e de modelo apresentadas, apesar de, em teoria, todas poderem ocorrer, a situação 4 é muito pouco provável. Isto é, não se considera verosímil que, havendo um erro nos dados, o modelo de interpretação do comportamento possa dar bons resultados. Por outro lado, especial atenção deve ser prestada quando o resultado é o descrito na situação 2 e em especial na 3, pois, nestes casos, a justeza dos dados não levanta reservas, mas a resposta encontra-se longe do comportamento modelo.

4. SISTEMA DE ARQUIVO DE DADOS

4.1. Diagnóstico, objectivos e solução proposta

Da análise feita aos sistemas de armazenamento de dados das diversas barragens, concluiu-se que os mesmos se têm mostrado adequados à preservação, em bruto, da informação referente à leitura dos aparelhos. No entanto, mostraram algumas fragilidades, que podem ser resumidas nos seguintes itens:

- a informação é relativamente estanque, isto é, só existe na barragem, junto do responsável pela exploração do sistema de observação;

- o seu fornecimento, tal como por exemplo, no âmbito do presente trabalho, é feito casuisticamente, a pedido;
- há importantes duplicações de informação, não sendo sempre assegurada a sua coerência (entre os diversos registos duplicados);
- não há, em geral, validação dos dados;
- não há, em geral, validação dos resultados;
- não estão implementados sistemas rotineiros de backup de dados (no entanto, os backups existem, sendo feitos pelos responsáveis pela observação das obras);
- o sistema vigente não é flexível no que respeita à divulgação da informação, embora a divulgação, por exemplo, para os escritórios em Maputo, possa ser feita, essa acção implica uma intervenção dos responsáveis pela observação (envio de e-mail, por exemplo).

Um dos objectivos do presente contrato passa pela reorganização da forma como a informação relativa às barragens é armazenada, preservada e transmitida aos diversos agentes interessados. Actualmente existem diversas plataformas de partilha de documentos que permitem alterar de forma significativa a forma de armazenar, explorar e transmitir diversos tipos de informação, nomeadamente, relativa às barragens. Algumas das soluções disponíveis implicam a materialização de um servidor que centraliza a informação e a disponibiliza aos utilizadores autorizados. São soluções poderosas e flexíveis, mas apresentam a desvantagem de implicarem custos significativos de manutenção/gestão e de actualização que podem ser evitados. Outras alternativas, eventualmente mais limitadas nalguns aspectos, mas mais potentes noutros, passam pelo uso dos recursos gratuitos existentes na internet, desde que se possam cumprir os seguintes requisitos: i) segurança da informação e; ii) preservação da informação.

Tendo em consideração as plataformas existentes e ponderando os prós e contras das diversas hipóteses, decidiu-se adoptar uma plataforma baseada nos “*google documents*”. De uma forma simplista os “*google documents*” apresentam-se como uma plataforma colaborativa gratuita com editor de texto, folha de cálculo, aplicação de apresentações e serviço de armazenamento de dados, que permite a colaboração “*on-line*” em tempo real entre utilizadores. Pela sua natureza gratuita, o serviço apresenta algumas restrições, nomeadamente no espaço associado a cada conta e na velocidade de transmissão de dados. Porém, para os efeitos pretendidos, nomeadamente para o acesso “*on-line*” à informação de exploração das albufeiras e para o controlo da segurança das barragens, o serviço disponível é suficiente. As vantagens desta opção são, entre outras: custo nulo; sincronismo imediato da informação; disponibilidade da informação, em condições semelhantes, em qualquer região; plataforma programável em “*javascript*”; disponibilidade de funções básicas de folhas de cálculo; facilidade na exportação de dados; facilidade na adaptação a sistemas de aquisição automática; espaço disponível; acesso programático à base de dados (§4.3); ferramentas de apresentação de resultados existentes; ferramentas de importação/exportação, facilidade de realizar “*backups*” (§4.4); plataforma em desenvolvimento contínuo; facilidade de integrar informação de diversos tipos, incluindo dados numéricos, relatórios e fotos.

No entanto, há também algumas desvantagens que interessa ponderar: ao usar a plataforma gratuita do sistema “*google*”, não há qualquer compromisso contratual de preservação da informação; por não serem específicas, as ferramentas disponíveis apresentam algumas limitações; é necessário manter um conhecimento actualizado da evolução (normalmente positiva) do sistema disponibilizado pela “*google*”.

Por questões relacionadas com a gestão do espaço de armazenamento disponível e com a compartimentação da informação, consideraram-se, para as diversas barragens, espaços de armazenamento da informação individualizados.

4.2. Endereços das barragens

A gestão eficiente da informação resultante de cada barragem recomenda, tal como se referiu, que sejam criados repositórios distintos para o arquivo da informação. Para além da questão da compartimentação, acresce que o espaço disponível em cada conta é limitado, pelo que, há vantagem em poder dispor de várias contas.

Para o efeito foram criadas, para as barragens, 4 contas com credenciais de acesso individualizadas. Cada conta está associada a um endereço de e-mail e um calendário o que permite, adicionalmente, a comunicação com os responsáveis pela segurança da barragem e a utilização do calendário para a programação de acções, nomeadamente de manutenção.

Para além destas contas, foi criada outra, destinada (mas não limitada) à consulta de dados relativos a todas as barragens. Esta conta destina-se essencialmente a centralizar a informação relativa à exploração das albufeiras e é primordialmente acedida na sede da Ara-Sul em Maputo. Se for julgado conveniente, poder-se-ão integrar nesta conta, para consulta, outros elementos relativos às barragens, nomeadamente elementos relacionados com o controlo de segurança ou com a gestão corrente das barragens, nomeadamente com os aspectos relacionados com a manutenção dos equipamentos.

4.3. Acesso aos dados de exploração

Uma vez autenticado no sistema o utilizador tem acesso à informação pertinente sobre a exploração das albufeiras (Fig. 5). Alguns dos mostradores poderão demorar alguns segundos a actualizar os dados. Por vezes, dependendo da velocidade do sistema (computador e/ou ligação à “internet”), a actualização poderá ser incompleta. Nesses casos, a tecla F5 (“refresh”) deverá permitir a actualização manual. Os dados são automaticamente actualizados a cada 5 min, embora se possa alterar este intervalo de tempo.

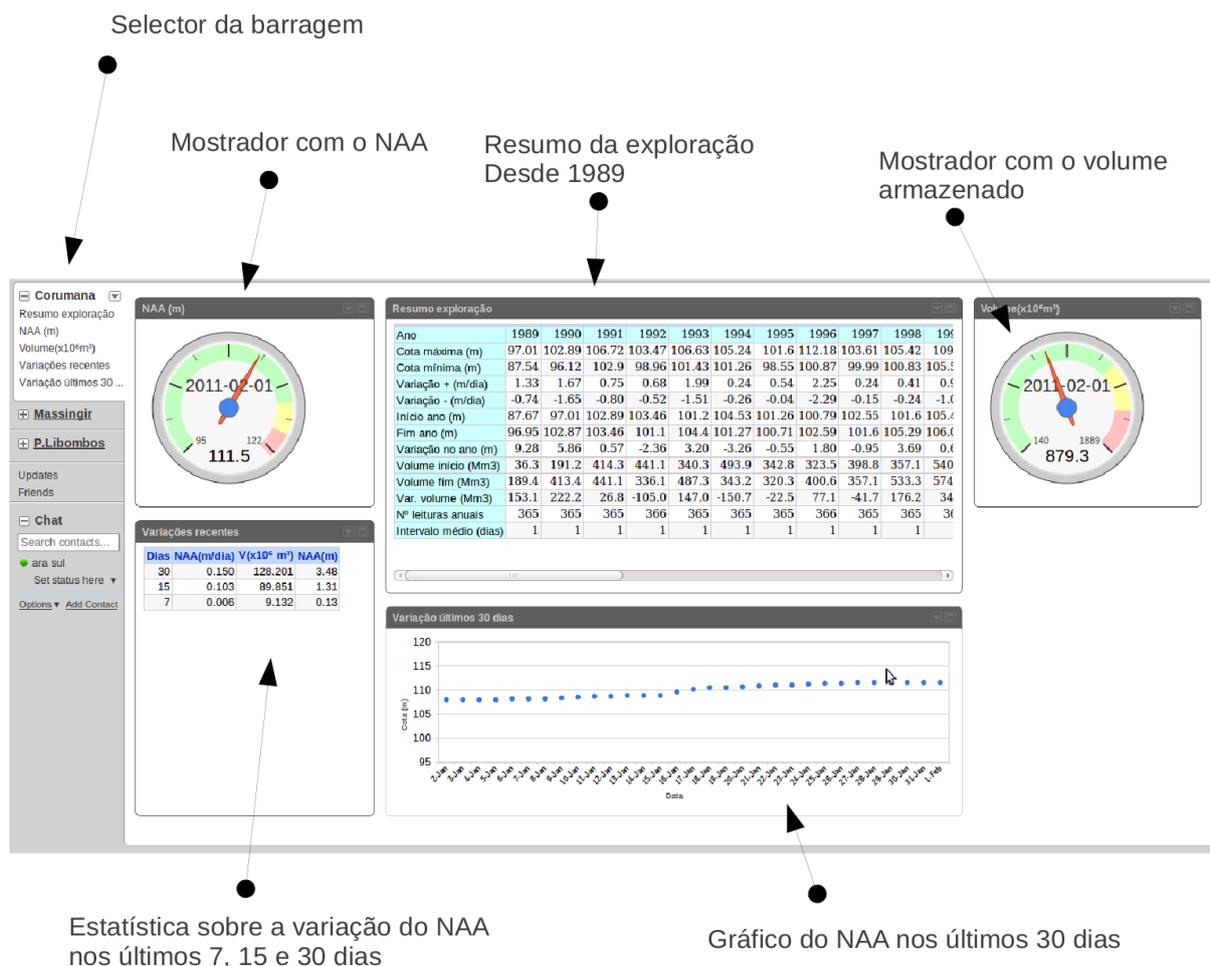


Fig 5. Exemplo dos dados resumidos da exploração da albufeira da Corumana

Como foi anteriormente referido, toda a informação disponibilizada na página de resumo de cada albufeira pode ser incluída em qualquer outra página “web”, bastando para tal incluir os códigos correspondentes a cada item. Para além disso, uma das vantagens do sistema de arquivo de dados nos documentos “google” é o de permitir aceder aos dados arquivados de forma programática, isto é, sem intervenção humana, facilitando a introdução de dados provenientes de dispositivos de aquisição automática ou a análise detalhada dos resultados, por exemplo, para a elaboração de relatórios de exploração ou de análise de segurança.

Para se poder tirar partido desta possibilidade é necessário instalar algum software de suporte das aplicações. A lista actualizada de dependências pode ser encontrada no site da “google”, nos detalhes da “api - application programming interface”:

4.4. Backups

A fim de garantir a preservação da informação é fundamental realizar, com um carácter sistemático, cópias de segurança dos arquivos armazenados “on-line”. Essa operação pode ser feita manualmente, através das capacidades de exportação do sistema de arquivo da “google” ou, em alternativa, recorrendo a programas de “backup”, que procedem, de forma automática, à ligação às contas associadas a cada barragem e copia as versões actualizadas dos diversos ficheiros. Foram fornecidos programas para “Linux” e “Windows”. Durante o contrato com a ARA-Sul o LNEC procede à realização de cópias de segurança diárias.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente artigo apresenta a fundamentação da abordagem metodológica aplicada à análise de comportamento das Barragens de Massingir, Corumana, Pequenos Libombos e Macarretane em Moçambique, no âmbito de um contrato celebrado entre a Administração Regional de Águas do Sul (ARA-Sul) e o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Para além dos aspectos teóricos relativos à forma de modelação do comportamento observado, apresenta-se o sistema de armazenamento de dados e de exploração de resultados, concebido para fazer face às necessidades de controlo de segurança e de gestão das albufeiras.

Salienta-se a utilização de ferramentas abertas para o estabelecimento dos modelos de comportamento e para o sistema de arquivo de dados, permitindo a racionalização dos custos e a garantia da preservação da informação.

Os artigos referentes às barragens de Massingir, Corumana e Pequenos Libombos, também publicados nos anais deste Congresso, procedem à implementação, na prática, e para cada uma das 3 obras, dos modelos e sistemas de gestão da informação aqui explanados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cardoso, R. et al. Behaviour of an earth-rockfill dam during its construction considering climate actions. Proc. 6th International Conference on Dam Engineering. LNEC Lisbon 15-17 February 2011.

Oliveira, S. B. 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; 2000.