

DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE NOVOS MODELOS NUMÉRICOS E DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA NA ANÁLISE DOS EFEITOS DO TEMPO EM BARRAGENS DE BETÃO

Sérgio Oliveira

Inv. Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil



RESUMO

Neste trabalho salientam-se as vantagens da utilização integrada de modelos numéricos e modelos estatísticos de interpretação quantitativa no controlo de segurança de barragens, e apresentam-se os novos desenvolvimentos nesta área, nomeadamente ao nível da modelação do comportamento de barragens de betão ao longo do tempo tendo em conta os efeitos viscoelásticos e de progressão do dano.

1. INTRODUÇÃO

Actualmente encontram-se em plena exploração várias centenas de grandes barragens de betão, com uma idade média de quase 50 anos. Muitas dessas obras, de elevado risco potencial e já com sinais de deterioração, continuarão a operar no futuro, sendo previsível que a sua vida útil se estenda significativamente.

Dado que todas as obras em exploração, desde as mais modernas às mais antigas, devem respeitar as presentes exigências de segurança regulamentares, é cada vez mais importante a utilização de modernas técnicas de observação e o desenvolvimento de adequados modelos de referência, para interpretação e previsão do comportamento de obras com sinais de deterioração, com vista à verificação das crescentes exigências de segurança e ao apoio a decisões acerca de eventuais

intervenções de conservação ou reabilitação. Neste quadro é naturalmente crescente a necessidade de dispor de modelos fiáveis para interpretação e previsão do comportamento de obras com problemas de deterioração.

No desenvolvimento destes modelos há que enveredar por estratégias de utilização sistemática e integrada de vários tipos de modelos. Nomeadamente, para cenários correntes, há que desenvolver e utilizar de forma integrada novos modelos de interpretação quantitativa e novos modelos numéricos de elementos finitos que permitam analisar os efeitos do tempo da forma mais adequada. Esta tarefa deve envolver, necessariamente, a identificação dos efeitos viscoelásticos e a sua correcta separação de outros efeitos do tempo, nomeadamente associados a expansões, fissuração progressiva ou assentamentos de fundação.

2. UM NOVO MODELO DE INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA

Quanto aos modelos de interpretação quantitativa (modelos que permitem analisar os resultados da observação separando os efeitos das diferentes solicitações com base em determinadas hipóteses semi-empíricas e em técnicas estatísticas de minimização de

erros, pelo que exigem amostras de resultados observados de boa qualidade estatística) apresenta-se uma nova metodologia que permite a separação dos efeitos do tempo associados ao efeito viscoelástico da pressão hidrostática dos restantes efeitos do tempo (Fig.1) o que, no caso de muitas das obras actualmente em serviço, é fundamental.

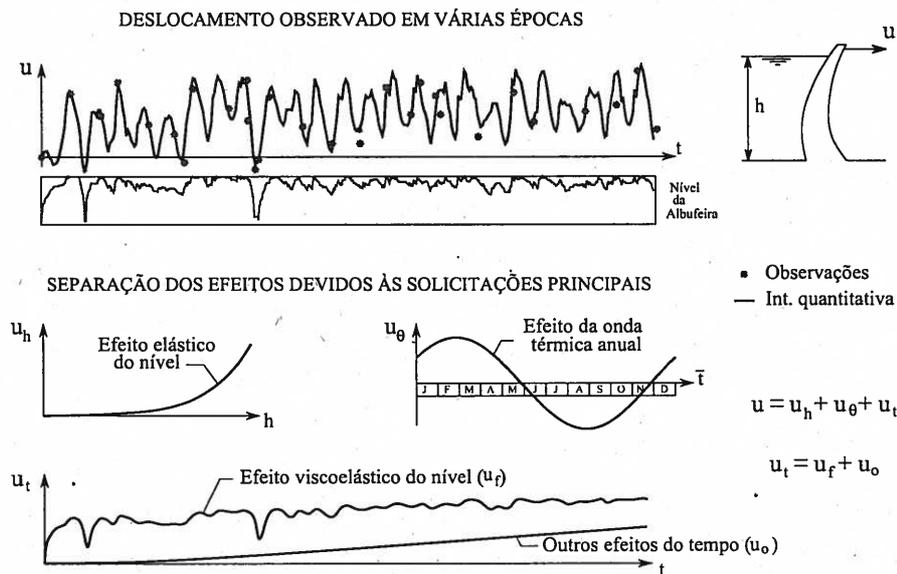


Figura 1 - Modelo de interpretação quantitativa que permite a separação dos efeitos viscoelásticos associados à pressão hidrostática dos restantes efeitos do tempo.

Esta nova metodologia de interpretação quantitativa é utilizada neste trabalho para análise de deslocamentos contudo salienta-se a sua excelente adequabilidade para a interpretação quantitativa de extensões observadas em grupos de extensómetros com vista à respectiva conversão em tensões, tendo em conta os efeitos de fluência e de relaxação.

3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE CONJUNTA DA FISSURAÇÃO E DOS EFEITOS DO TEMPO

Quanto aos modelos numéricos, salienta-se que o contínuo aumento das capacidades computacionais continua a potenciar o respectivo desenvolvimento, tornando possível simular aspectos do comportamento dos materiais cada vez mais específicos tais como efeitos de acumulação

de extensões irreversíveis, dano, enfraquecimento, maturação, fluência, etc. Nesta perspectiva é proposto um modelo, computacionalmente eficiente e baseado em parâmetros de claro significado físico, que permite conciliar um modelo de dano isotrópico (de duas variáveis de dano independentes, uma para a tracção e outra para a compressão) com uma formulação viscoelástica (Fig.2). Trata-se de um modelo cuja principal característica é permitir a simulação de roturas para tensões inferiores à resistência de pico, através do aumento das extensões por fluência, até ao ramo de enfraquecimento. Desta forma é possível, com este modelo, representar vários aspectos do comportamento do betão determinantes no processo de iniciação e progressão da fissuração, nomeadamente a ocorrência de dano e de eventuais roturas devido ao aumento das extensões ao longo do tempo.

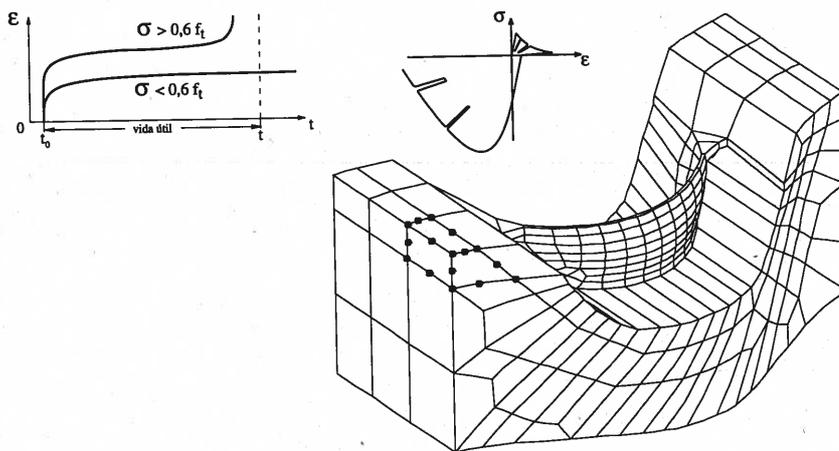


Figura 2 - Modelo numérico de elementos finitos tridimensionais com uma lei constitutiva que conjuga dano e viscoelasticidade.

4. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA BARRAGEM DO CABRIL. UTILIZAÇÃO INTEGRADA DOS DOIS TIPOS DE MODELOS DESENVOLVIDOS

A análise do comportamento da barragem do Cabril, observado ao longo da vida da obra, mostrou que desde o início da exploração (1954) terão surgido fissuras horizontais, visíveis na zona superior do paramento de jusante (Fig.3), que influenciavam o campo de deslocamentos nessa zona. A análise dos deslocamentos horizontais observados na zona superior da barragem foi efectuada com o modelo de interpretação quantitativa proposto, considerando separadamente um período anterior às obras de reabilitação (1981) e o período posterior. Os resultados da interpretação quantitativa mostraram que na zona central os deslocamentos máximos para jusante não ocorrem à cota do coroamento mas sim a meio da zona fissurada, a cerca de 15 m do coroamento; mostraram ainda que o efeito do tempo se pode decompor numa parcela de fluência para jusante e numa parcela para montante, esta última coerente com a existência de

uma expansão moderada, mais notória no período posterior às obras de reabilitação. Quanto aos deslocamentos verticais do coroamento a aplicação deste novo modelo de interpretação quantitativa mostra igualmente, de forma muito evidente, que no período posterior às obras de reabilitação os efeitos do tempo são decomponíveis numa parcela correspondente aos efeitos expansivos e noutra correspondente ao efeito de fluência associada à pressão hidrostática (Fig.4).

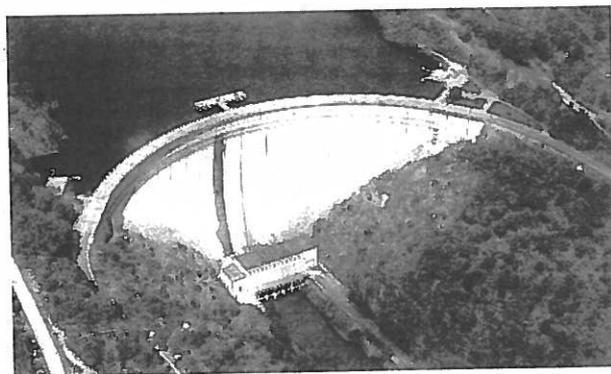


Figura 3 - Barragem do Cabril

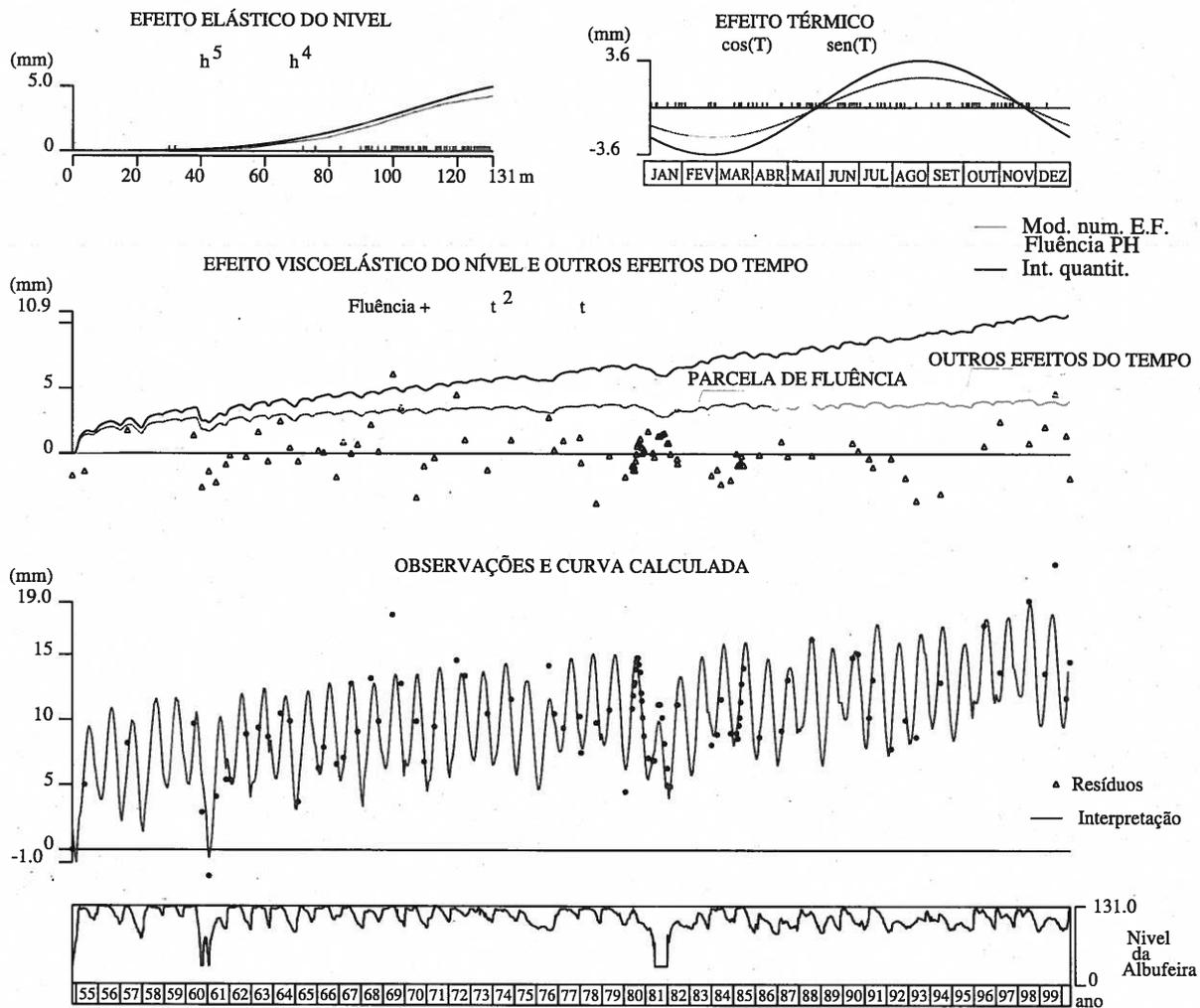


Figura 4 - Aplicação do novo modelo de interpretação quantitativa proposto na análise do deslocamento vertical de um ponto do coroamento da barragem do Cabril.

Numericamente foram efectuados diversos estudos paramétricos, com o modelo proposto para análise conjunta do dano e da viscoelasticidade, com vista a estudar a influência no comportamento da barragem do Cabril das características viscoelásticas e de resistência à tracção do respectivo betão. Tais estudos permitiram evidenciar a adequabilidade do modelo numérico proposto para a interpretação do comportamento observado ao longo do tempo, tendo em conta a influência conjunta dos efeitos viscoelásticos e da fissuração, tendo-se considerado: i) três leis de fluência, definidas de acordo com a expressão proposta pela Teoria da Solidificação, por forma a definir uma envolvente das características de fluência do betão da

barragem do Cabril; ii) quatro leis de resistência à tracção por forma a definir uma envolvente das características de resistência à tracção do betão desta obra.

Os resultados numéricos obtidos mostraram que o modelo proposto permite simular de forma coerente a progressão da fissuração ao longo do tempo. A consideração de uma maior fluência conduz a uma maior progressão da fissuração ao longo do tempo, o mesmo sucedendo com a consideração de uma menor resistência à tracção; tendo sido notória a maior influência dos parâmetros de resistência à tracção. O modelo numérico desenvolvido permitiu prever com bastante precisão a localização das fissuras mais profundas, visíveis na zona central do paramento de

jusante a cerca de 16 m do coroamento. Para as acções consideradas os resultados numéricos indicaram que a fissuração deveria atingir, na zona mais afectada, cerca de 2/3 da espessura, o que se revelou coerente com os resultados de vários ensaios in-situ, nomeadamente ensaios de ultra-sons e ensaios de injeção de líquidos com colorantes a partir dos tubos de arejamento.

A evolução ao longo do tempo da deformada da zona superior da consola central, registada em termos de histórias de deslocamentos observados por geodesia de

posição, foi perfeitamente simulada tendo em conta o efeito conjunto da viscoelasticidade e da fissuração o que não se consegue quando apenas se consideram os efeitos viscoelásticos.

O modelo numérico desenvolvido foi igualmente utilizado para efectuar uma previsão da evolução da fissuração entre 2000 e 2005, segundo a qual ocorreria uma ligeira progressão dos danos à tracção na zona afectada, devido, essencialmente, aos elevados níveis de água ficticiamente considerados nesse estudo de previsão.

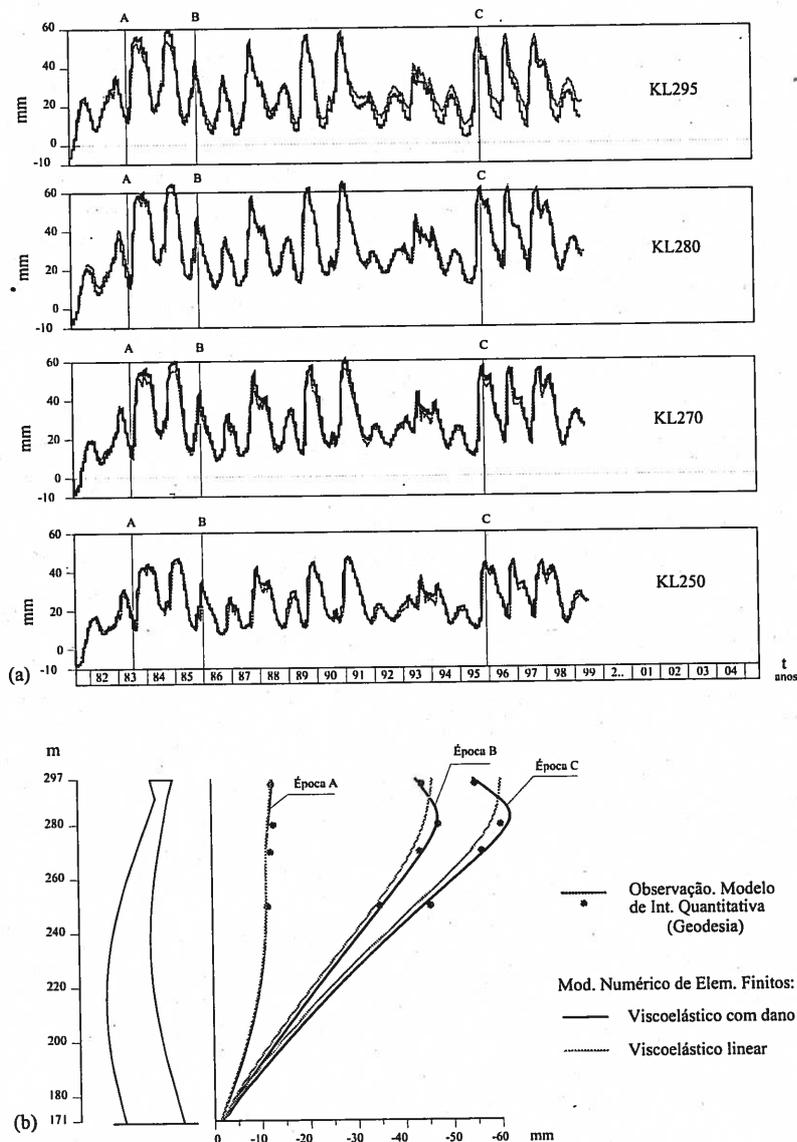


Figura 5 - História de deslocamentos horizontais na consola central. Comparação de resultados observados (interpretação quantitativa) e de resultados calculados numericamente.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentam-se desenvolvimentos ao nível das metodologias para interpretação do comportamento observado ao longo tempo, propondo-se um novo modelo de interpretação quantitativa que permite separar a parcela viscoelástica de outros efeitos o tempo e ao nível dos modelos numéricos de elementos finitos propondo-se uma nova lei constitutiva, que conjuga dano e viscoelasticidade, adequada para a simulação dos fenómenos subjacentes ao aparecimento e progressão da fissuração ao longo do tempo sob as diversas acções de serviço, na perspectiva de constituição de ferramentas de análise para previsão do comportamento a médio prazo de obras com problemas de deterioração.

A aplicação do novo modelo numérico apresentado na análise do comportamento da barragem do Cabril, uma obra com problemas de fissuração evolutiva e sujeita a uma acção expansiva de pequena expressão, permitiu mostrar que se trata de um modelo adequado para estudar o comportamento de obras sujeitas a processos de deterioração ao longo tempo. Nomeadamente mostrou-se que este modelo numérico permite simular aproximadamente o aumento da fissuração ao longo do tempo, quer em espessura quer em extensão aparente no paramento de jusante. A história das deformações observadas na zona superior da obra, claramente influenciadas pela fissuração, foram igualmente bem explicadas pelo

modelo numérico proposto cujos resultados apresentaram uma boa concordância com os resultados do novo modelo de interpretação quantitativa proposto na análise dos deslocamentos observados na zona superior da barragem. Este estudo comparativo permitiu mostrar o interesse da utilização integrada dos dois tipos de modelos apresentados como forma de aumentar a fiabilidade das interpretações pretendidas.

REFERÊNCIAS

- S. Oliveira, *Modelos para análise do comportamento de barragens de betão considerando a fissuração e os efeitos do tempo. Formulações de dano*, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (2000).
- R. Faria, J. Oliver and M. Cervera, "A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures", *Int.J. Solids Structures*, **35**(14), 1533-1558 (1998).
- I. Carol and Z.P. Bazant, "Viscoelasticity with aging caused by solidification of nonaging constituent", *J. Eng. Mechanics*, **119** (1993).
- Z.P. Bazant and S.t. Wu, "Dirichlet series creep function for aging concrete", *J. Eng. Mech. Division (ASCE)*, **99**(EM2) (1973).
- Z.P. Bazant and J. Planas, *Fracture and size effect in concrete and other quasi-brittle materials*, CRC Press, USA (1998).