

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE BARRAGENS PORTUGUESAS DE ENROCAMENTO COM CORTINA A MONTANTE

Structural behaviour of Portuguese rockfill dams with upstream impervious membranes

Fernando Pardo de Santayana*

Eduardo Fortunato**

António A. Veiga Pinto***

RESUMO – Portugal, embora possuindo um reduzido número de barragens, tem uma vasta experiência no projecto, construção e avaliação da segurança de barragens, em particular devido ao contributo dos estudos realizados no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Neste país existem 7 barragens de enrocamento com cortina a montante, 4 delas construídas nos últimos 15 anos. Os autores do artigo têm desenvolvido vários estudos de investigação para todas estas barragens, nomeadamente no âmbito da observação e análise do comportamento estrutural e da avaliação da segurança. Apresenta-se alguma da experiência que o LNEC detém sobre este tipo de barragens de enrocamento com cortina a montante, incluindo uma breve descrição das barragens e alguns dos resultados mais relevantes da observação, nomeadamente no que diz respeito às deformações.

ABSTRACT – Though having a relatively limited number of dams, Portugal has gained a considerable experience in design, construction practice and safety analysis of dams, in particular as a result of the contributions derived from the studies carried out by the National Laboratory of Civil Engineering (LNEC). There are 7 rockfill dams with upstream impervious membrane in Portugal, 4 of them built in the last 15 years. The authors of this paper have been involved in several research studies for all these dams, concerning monitoring and analyses of structural behaviour and safety assessment. In the paper, some aspects of the experience acquired by the LNEC in this kind of rockfill dams are presented, including a brief description of the dams and some of the most significant monitoring results, particularly those related to movements.

1 – INTRODUÇÃO

Até à década de 60, as barragens de enrocamento com cortina de impermeabilização a montante eram executadas com enrocamento lançado, em camadas de elevada espessura. Os paramentos destas barragens eram bastante inclinados da ordem de 1V:1,3H, próximos do ângulo de talude natural dos materiais. Em 1958 foi construída em Portugal a Barragem de Paradela, com cerca de 110 m de altura. Naquela data era a barragem mais alta deste tipo a nível mundial. Barragens idênticas, mas de menor altura, tinham exibido um comportamento estrutural satisfatório. No entanto, a Barragem de Paradela exibiu deformações elevadas no maciço de enrocamento que conduziram à fissuração e à perda de estanqueidade nas juntas da cortina de montante e a elevados caudais de infiltração através dessa cortina. Este tipo de comportamento, surpreendente para a época, foi também observado noutras barragens de dimensão idêntica à de Paradela.

* Investigador Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil

** Investigador Auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: efortunato@lnecc.pt

*** Investigador Coordenador do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. E-mail: vpinto@lnecc.pt

A partir de estudos de caracterização dos materiais particulados, concluiu-se que as deformações em materiais de enrocamento se devem, em particular, à rotura de partículas rochosas nos pontos de contacto, com o conseqüente reajuste do meio particulado depois de cada fracturação. O nível de fracturação depende de vários factores, sendo o mais importante o estado de tensão instalado. Assim se explica que as barragens mais altas, em que os materiais estão sujeitos a tensões mais elevadas, tenham exibido maiores deformações. Outros factores que contribuem para a diminuição da fracturação dos blocos rochosos são os seguintes: índice de vazios reduzido, granulometria bem-graduada e material rochoso de elevada resistência. Com o reajuste das partículas verifica-se normalmente uma diminuição das deformações a longo prazo.

A partir da década de 60, tendo em conta os conhecimentos sobre a reologia dos materiais de enrocamento e o avanço tecnológico dos equipamentos de movimentação e compactação de materiais de aterro, os enrocamentos começaram a ser construídos com camadas de reduzida espessura e compactados com cilindros vibradores de peso estático mínimo de 100 kN. Foi considerado também conveniente a rega abundante dos materiais nas fases de preparação e compactação das camadas.

Nas análises estatísticas de acidentes de barragens tem-se verificado que as de enrocamento compactado com cortina a montante têm exibido um comportamento bastante satisfatório, se se excluirmos as que sofreram galgamento, devido a deficiências no âmbito da hidráulica operacional.

Em 1990 foi publicado em Portugal o Regulamento de Segurança de Barragens (RSB), cuja aplicação tem conduzido a uma actuação mais rigorosa na análise do comportamento e avaliação de segurança deste tipo de estruturas. Em particular, passou a ser obrigatório a elaboração de planos de observação para cada barragem, os quais devem conter os modelos de comportamento com a previsão dos valores das grandezas a observar. No caso das barragens de enrocamento com cortina a montante, tem-se dado especial atenção aos deslocamentos exibidos pela estrutura e aos caudais de infiltração. O Laboratório Nacional de Engenharia Civil, pela sua experiência e atribuição no RSB, tem sido responsável pela análise do comportamento e avaliação da segurança de praticamente todas as barragens portuguesas, construídas recentemente, tendo ainda acompanhado os estudos de avaliação da segurança das barragens mais antigas. Nos capítulos seguintes apresenta-se uma breve descrição das barragens de enrocamento com cortina a montante e comentam-se alguns dos resultados mais relevantes relativos à observação das deformações exibidas pelas mesmas.

2 – BARRAGENS ANALISADAS

Um dos principais aspectos a considerar no âmbito do projecto de barragens de enrocamento com cortina a montante prende-se com a interacção entre o aterro e o órgão estanque. Com efeito, um dos aspectos mais delicados no comportamento deste tipo de estruturas é a necessidade de compatibilizar as deformações do aterro com as admissíveis na cortina, a qual é normalmente construída em betão armado ou com misturas betuminosas. Assim, tem havido uma grande preocupação em conhecer de forma bastante rigorosa o seu comportamento, em particular no que se refere aos deslocamentos que ocorrem nas diversas fases da vida da estrutura.

Nas obras deste tipo realizadas na última década em Portugal, têm sido instalados diversos dispositivos, quer durante, quer após a construção, com o objectivo de recolher dados que permitam analisar o comportamento, nomeadamente, acompanhar o desempenho da estrutura ao longo do tempo e estabelecer modelos de comportamento que possam ser utilizados em futuros projectos.

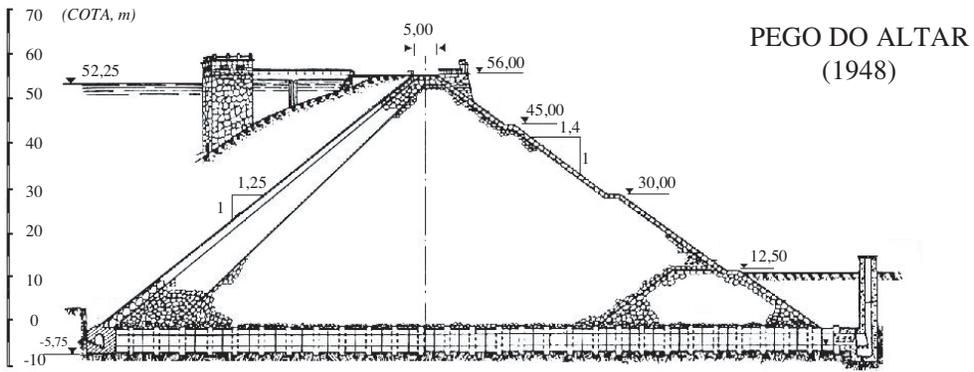
Apresenta-se seguidamente uma breve descrição das características das barragens deste tipo existentes em Portugal (Quadro 1), assim como dos respectivos sistemas de observação.

Quadro 1 – Características das barragens analisadas.

Barragem	Tipo de Enrocamento	Altura Máxima (m)	Volume Albufeira (hm ³)	Tipo de Cortina	Taludes	Volume Aterro (hm ³)	Comprimento Coroamento (m)	Data Fim da construção
Pego do Altar	Porfírico (lançado)	56	94	Metálica	1,25H:1V (m) 1,4H:1V (j)	0,37	192	1948
Paradela	Granítico (lançado)	108	164,5	Betão armado	1,3H:1V (m) 1,3H:1V (j)	2,70	540	1958
Vilar	Granítico (lançado)	58	100	Betão armado	1,1H:1V (m) 1,3H:1V (j)	0,30	240	1965
Lagoacho	Granítico (compactado)	38	4,9	Betão armado	1,3H:1V (m) 1,3H:1V (j)	0,25	240	Julho 1992
Apartadura	Calcário dolomítico (compactado)	46	7,5	Betão betuminoso	1,6H:1V (m) 1,45H:1V (j)	0,45	284	Julho 1992
Odeleite	Metagrauváquico (compactado)	65	130	Betão armado	1,3H:1V (m) 1,4H:1V (j)	1,00	350	Mai 1996
Arcossó	Granítico (compactado)	40	4,9	Betão armado	1,7H:1V (m) 1,5H:1V (j)	0,39	315	Agosto 1999

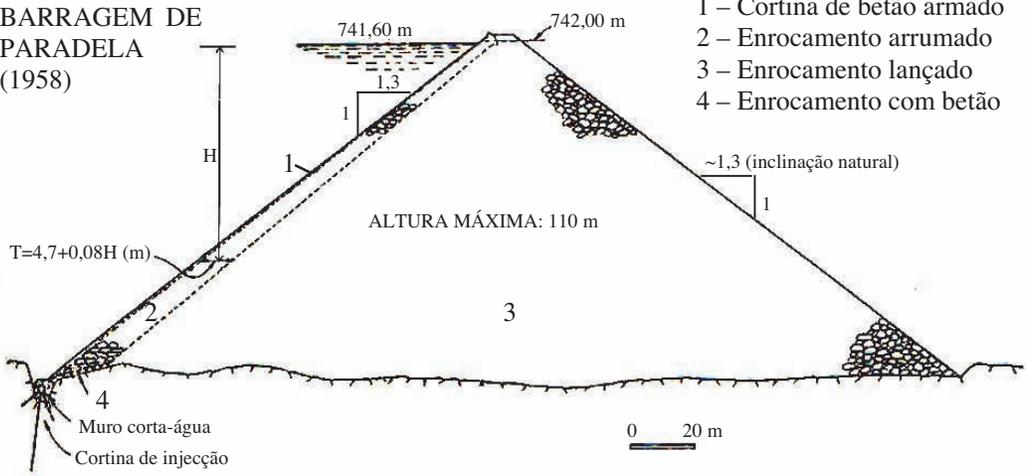
A Barragem de Pego do Altar (Fig. 1) localiza-se na ribeira de Santa Catarina, no concelho de Alcácer do Sal. O enrocamento desta barragem foi parcialmente arrumado com equipamento mecânico (gruas), nomeadamente na zona de montante, bem como no pé e no paramento do talude de jusante. A cortina de impermeabilização na face de montante é feita de chapas de aço soldadas (de 1/4 a 5/16 de polegada de espessura). Esta cortina, provida de juntas de dilatação segundo a linha de máxima inclinação, apoia sobre uma camada de betão de regularização colocada sobre uma camada de alvenaria de espessura variável de 0,8 m (no topo) a 2,0 m (na base). A barragem é provida de um muro corta-águas e uma galeria de inspecção. Como dispositivos de observação a barragem dispõe, basicamente, de marcas superficiais e medidores de caudais.

Relativamente à Barragem de Paradela (Fig. 1), a sua estanqueidade é assegurada por uma cortina de betão armado no paramento de montante, com juntas verticais e horizontais. Esta cortina apoia sobre uma camada de enrocamento arrumado construída sobre o maciço de enrocamento lançado. A ligação entre a cortina de injeção na fundação e a cortina de impermeabilização no paramento de montante foi assegurada mediante um muro corta-águas, de betão, provido de galeria. Devido à técnica de construção utilizada para o aterro, a cortina de montante sofreu deslocamentos apreciáveis que, desde o primeiro enchimento, se reflectiram no aparecimento de fissuras e em elevados caudais de infiltração. A barragem foi objecto de várias reparações desde cedo, tendo em vista reduzir os caudais de infiltração. A mais importante destas reparações realizou-se em 1980 e consistiu no revestimento do paramento de montante com uma membrana flexível constituída por uma fibra sintética impregnada com uma resina impermeabilizante. O sistema de observação inclui: marcas superficiais localizadas em várias fiadas horizontais sobre a cortina, para medição dos deslocamentos horizontais; uma linha de nivelamento no coroamento junto à cortina; bases de alongâmetro para medição dos deslocamentos de juntas na galeria corta-águas; medidores de caudais em diferentes pontos das galerias; descarregador definitivo a jusante da barragem; piezómetros pneumáticos na fundação; termógrafo, limnómetro e udógrafo.



PEGO DO ALTAR
(1948)

BARRAGEM DE
PARADELA
(1958)



- 1 – Cortina de betão armado
- 2 – Enrocamento arrumado
- 3 – Enrocamento lançado
- 4 – Enrocamento com betão

BARRAGEM DE
VILAR (1965)

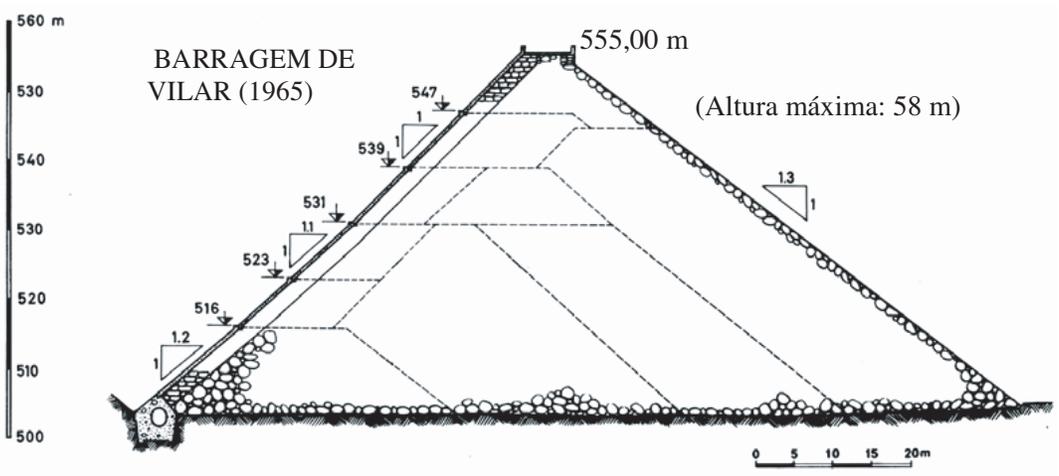


Fig. 1 – Perfis tipo das três barragens de enrocamento lançado.

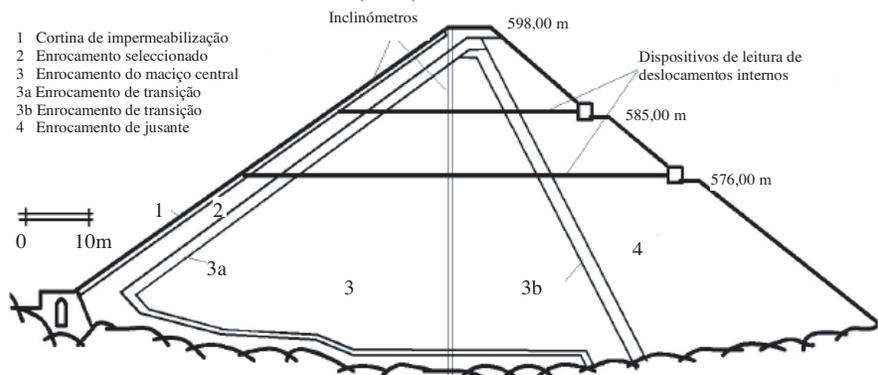
A Barragem de Vilar, no rio Távora, construída com enrocamento lançado e com cortina de betão armado no paramento de montante com juntas verticais e horizontais, tem demonstrado um bom comportamento estrutural ao longo dos anos. Embora não estivesse em causa a sua segurança estrutural, foi submetida a reparações a fim de diminuir os prejuízos de exploração provocados por infiltrações excessivas através da cortina de impermeabilização. O sistema de observação é constituído basicamente por: uma rede de triangulação no paramento de montante; uma linha de nivelamento geométrico no coroamento; piezómetros na fundação; alongâmetros nas juntas da galeria do muro corta-águas; e descarregador triangular a jusante.

A Barragem do Lagoacho (Fig. 2), situada na Serra da Estrela, no rio Alva, destina-se à produção de energia, e é constituída por um aterro principal e por uma portela na margem direita, ambos de enrocamento granítico e com cortinas de estanqueidade de betão armado a montante. A cortina, de 0,4 m de espessura, está dividida por juntas de contracção verticais em lajes de 15 m de largura, as quais apoiam ao longo duma junta perimetral inferior num plinto solidarizado à fundação em rocha sã (granítica) por ancoragens passivas. Foi a primeira barragem portuguesa de enrocamento compactado com cortina a montante em betão armado. O sistema de observação permite a medição de deslocamentos superficiais (redes de triangulação de montante e de jusante e linhas de nivelamento no coroamento), de deslocamentos internos verticais e horizontais (tubos inclinométricos que funcionam também como baterias de assentamentos), de deslocamentos nas juntas na cortina de montante, de caudais infiltrados (medidores de caudais a jusante da barragem) e do nível de água na albufeira.

A Barragem de Apartadura (Fig. 2) faz parte do aproveitamento hidro-agrícola de Marvão. Trata-se da única barragem de enrocamento construída em Portugal com uma cortina de impermeabilização de betão betuminoso a montante. Os materiais de enrocamento utilizados na construção foram obtidos por exploração de uma pedreira de calcário dolomítico. A ligação da cortina com a fundação é efectuada através de uma galeria de drenagem. A fundação é constituída por xistos com intercalações de quartzitos e xistos grauvacóides. Durante a construção do aterro foram instrumentados diversos perfis de observação. A duas cotas de 3 perfis centrais foram instalados dispositivos que permitem determinar os deslocamentos horizontais internos na direcção montante-jusante, em diferentes pontos do mesmo alinhamento horizontal desses perfis. Estes dispositivos são constituídos por fios de aço ancorados no interior do aterro e ligados a terminais situados em centrais de leitura localizadas nas banquetas de jusante. Nos mesmos pontos do interior do aterro foram instalados dispositivos de leitura de assentamentos, através de diferenças de níveis hidráulicos, detectados por células eléctricas e medidos nas centrais de leitura. Nos mesmos perfis transversais existem ainda 3 tubos inclinométricos verticais, os quais permitem medir assentamentos e deslocamentos horizontais no interior do aterro e 3 tubos inclinados sob a cortina de impermeabilização de montante. A barragem dispõe ainda de uma rede de triangulação geodésica, linhas de nivelamento geométrico, medidores de caudais, piezómetros na fundação e escala limnimétrica.

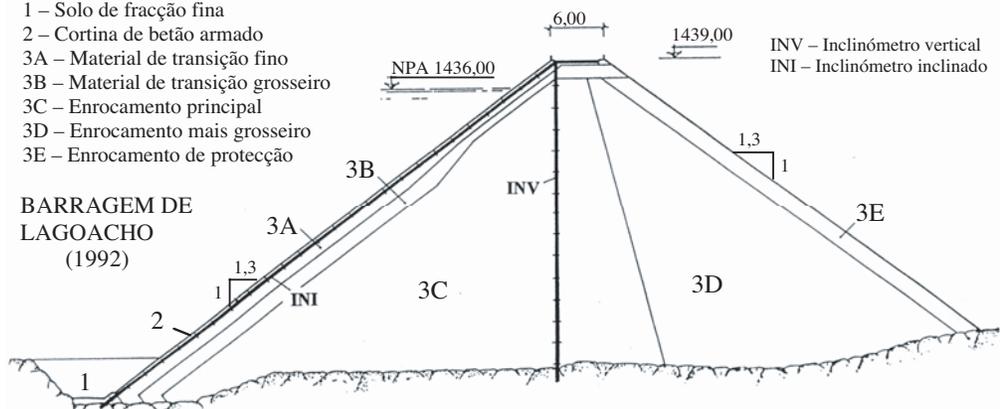
A Barragem de Odeleite (Fig. 2) localiza-se junto ao rio Guadiana, a cerca de 15 km a Norte de Vila Real de Santo António e destina-se ao abastecimento de água do Sotavento Algarvio e à rega. A barragem serve de suporte a uma via rodoviária e para além da estrutura principal, tem uma pequena portela de terra-enrocamento com cerca de 25 m de altura. O sistema de observação inclui dispositivos para medir os deslocamentos superficiais verticais (nivelamentos geométricos) e horizontais (geodesia de posição) e os deslocamentos internos subverticais e sob a cortina (tubos inclinométricos). Foram ainda instalados equipamentos para medir, a partir de uma banqueta de jusante, os deslocamentos internos verticais e horizontais em 3 linhas horizontais com direcção montante-jusante. O pé-de-jusante está assente sobre uma aluvião com cerca de 10 m de espessura, facto que não permitiu instalar um medidor de caudais de infiltração.

BARRAGEM DE APARTADURA (1992)

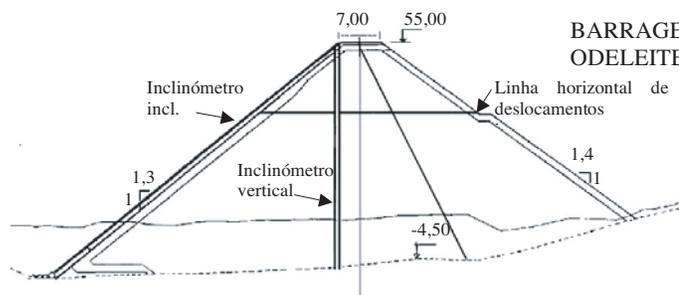


- 1 – Solo de fracção fina
- 2 – Cortina de betão armado
- 3A – Material de transição fino
- 3B – Material de transição grosseiro
- 3C – Enrocamento principal
- 3D – Enrocamento mais grosseiro
- 3E – Enrocamento de protecção

BARRAGEM DE LAGOACHO (1992)



BARRAGEM DE ODELEITE (1996)



- E1 – Enrocamento de transição
- E2 – Enrocamento de montante
- E3 – Enrocamento de jusante

BARRAGEM DE ARCOSSÓ (1999)

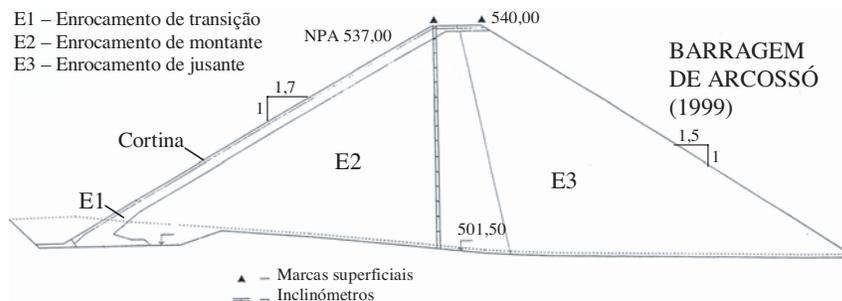


Fig. 2 – Perfis tipo das barragens de enrocamento compactado em análise.

A Barragem de Arcossó (Fig. 2) localiza-se na ribeira de Arcossó, afluente do rio Tâmega a montante de Chaves. A cortina de impermeabilização é constituída por um conjunto de painéis em betão armado com 0,25 m de espessura e 12 m de largura, que se desenvolvem no paramento de montante desde a cota do coroamento até ao plinto da fundação, construído em betão armado. A ligação do plinto à rocha de fundação (rocha granítica medianamente alterada a sã) foi reforçada por meio de ancoragens passivas. Para melhorar as condições de estanqueidade da fundação, foi executada uma cortina de injeções a partir do plinto. A inclinação relativamente suave dos taludes (Quadro 1) deve-se a que o projecto da barragem previa, inicialmente, uma cortina de impermeabilização de tipo betuminoso. O material de enrocamento utilizado é de natureza granítica, procedente de uma pedreira próxima do local da barragem. O sistema de observação inclui: 3 tubos inclinométricos verticais no interior do aterro para a medição de deslocamentos internos (verticais e horizontais), instalados na zona central do vale; 16 marcas superficiais, para a medição de deslocamentos superficiais (horizontais e verticais) no coroamento, a montante e a jusante; medidor de caudais e escala limnimétrica.

3 – COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Atendendo ao comportamento menos satisfatório observado no passado de barragens de enrocamento lançado, aquando dos estudos relativos ao projecto da Barragem de Odeleite, na década de 80, fez-se uma análise exaustiva de 40 barragens já construídas, com os objectivos de: seleccionar o tipo de cortina; definir o perfil tipo; optar entre um plinto ou uma galeria perimetral; definir as técnicas de construção mais adequadas; e efectuar uma previsão sobre a ordem de grandeza dos deslocamentos da barragem. Destes estudos e da análise estatística de acidentes em barragens deste tipo concluiu-se que: as actuais técnicas construtivas, nomeadamente com a compactação com cilindro vibrador e com a rega abundante dos materiais de enrocamento, já permitem a construção de maciços pouco deformáveis, compatíveis com a colocação de cortinas de betão armado a montante; em alternativa às galerias perimetrais, o plinto começa a ser a solução mais adoptada; as juntas horizontais são dispensáveis, excepto a junta perimetral que requer cuidados especiais; e as juntas verticais devem ser construídas sem espaçamento (Veiga Pinto, 1984).

3.1 – Fase de construção

A curva teórica de assentamentos durante a construção, na vertical do eixo longitudinal do aterro, é traduzida por uma parábola com o assentamento máximo localizado a meia altura da barragem, assumindo um modelo unidimensional, um material de aterro homogéneo e uma fundação indeformável. Considerando o caso bidimensional, a posição do ponto de assentamento máximo no fim da construção depende do valor do coeficiente de Poisson e das características dos taludes laterais, podendo ocorrer a meia altura do aterro ou a uma cota mais elevada. As heterogeneidades do material determinam também a localização do assentamento máximo (Pagano et al., 1998).

Relativamente às barragens de enrocamento lançado, não se dispõe de informação relativa a assentamentos internos. No caso da Barragem de Pego do Altar conhecem-se os assentamentos superficiais medidos em marcas localizadas nos paramentos de montante e de jusante a diferentes cotas (Palma Carlos, 1955). Em resultado da dificuldade na aquisição de materiais para a construção da cortina metálica (devido à 2ª guerra mundial), a construção do aterro decorreu de modo relativamente lento entre 1943 e 1948. Os assentamentos durante a construção foram maiores no paramento de montante do que no de jusante. Os valores máximos ocorreram a 60% da altura da barragem, sendo de 76 cm e 25 cm nos paramentos de montante e de jusante, respectivamente. Observou-se que os máximos incrementos do assentamento tiveram lugar durante as épocas de chuvas, mesmo em períodos com a colocação de enrocamento interrompida.

No que diz respeito às barragens de enrocamento compactado, na Fig. 3 apresentam-se os perfis de assentamento no final da construção correspondentes a três das barragens, determinados ao longo de alinhamentos verticais em perfis centrais. Nos cálculos tensão-deformação do projecto da Barragem de Apartadura, pelo método de elementos finitos e considerando um comportamento elástico linear para os materiais de aterro (módulo de Young de 80 MPa e coeficiente de Poisson de 0,30), obtinham-se deslocamentos máximos para a fase de construção de cerca de 8 cm na zona central da barragem. Durante a construção, os assentamentos máximos medidos nos 3 tubos inclinométricos verticais no interior do aterro foram da ordem de 5 cm (Fig. 3). Uma análise simplificada (Veiga Pinto et al., 1998) permitiu estimar que o módulo de deformabilidade, E (entendido como a razão entre a carga geostática e a deformação vertical entre travessas de leitura), dos materiais devia variar entre 70 e 360 MPa, correspondendo os valores mais baixos à zona inferior do aterro.

Relativamente à Barragem de Lagoacho, os máximos assentamentos medidos durante a construção foram da ordem dos 7 cm, a meia altura da barragem, valores semelhantes aos previstos nos cálculos de projecto.

Durante a construção da Barragem de Odeleite determinaram-se assentamentos bastante elevados relativamente ao que foi previsto (Fig. 3). Assim, a deformação máxima a meia altura do aterro foi de 2,4%. A partir dos assentamentos observados, por retro-análise, obteve-se, nos primeiros 15 m de aterro, um módulo de deformabilidade de 35 MPa, e nos 50 m superiores, de 50 MPa. Estes valores foram inferiores ao previsto no estudo prévio (130 MPa) e no projecto de execução (90 MPa). Este facto justifica-se porque na construção se utilizou um material metagrauváquico medianamente alterado, e que se manifestou bastante sensível ao efeito da água adicionada em abundância na fase de construção. Inicialmente, no anteprojecto, tinha-se previsto utilizar um metagrauvaque de elevada resistência na construção do aterro.

No que diz respeito à Barragem de Arcossó (Pardo de Santayana et al., 2000), o projecto previa durante a construção um assentamento máximo de 20 cm, sensivelmente a meia altura do aterro, considerando um módulo edométrico (D) de 55 MPa (a partir dos resultados da caracterização geomecânica dos materiais e aplicando o método empírico derivado da Classificação de Marsal e Resendiz (Marsal et al., 1975) e a seguinte formulação simplificada (Charles et al., 1988): $\Delta h_{\max-c} = 0,30(\gamma H^2/D)$. Os assentamentos internos máximos medidos no final da construção, nos três inclinómetros da barragem, variaram entre 15 e 22 cm (Fig. 3), correspondendo a valores próximos dos

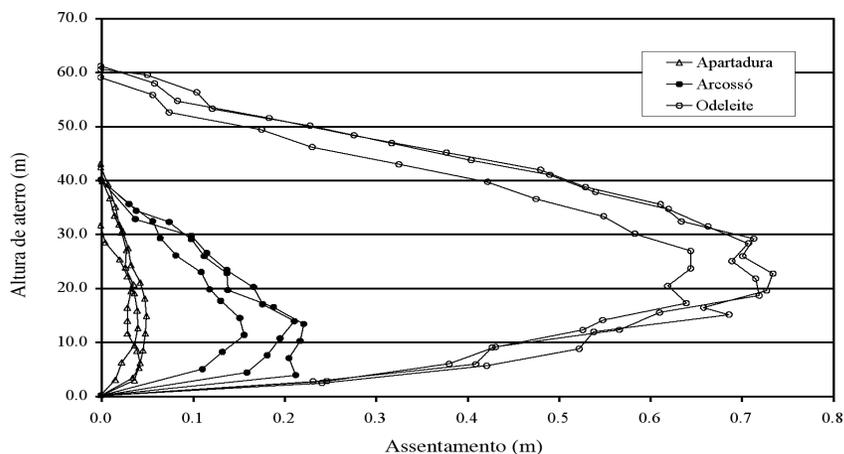


Fig. 3 – Assentamentos medidos durante a construção em tubos inclinométricos subverticais.

previstos. Observou-se, porém, que o assentamento máximo ocorreu a aproximadamente um terço da altura da barragem e não a meia altura, o que poderá ter resultado da existência de uma deformabilidade não desprezável do terreno da fundação, ou a uma maior deformabilidade dos materiais de enrocamento da base do aterro. Relativamente ao módulo de deformabilidade estimado a partir das leituras de assentamentos internos nos tubos inclinométricos (Pardo de Santayana et al., 2000) considerou-se a existência de, basicamente, três zonas distintas em altura: nos primeiros 13 m valores de cerca de 65 MPa; na zona intermédia, valores de cerca de 125 MPa; nos 13 m superiores, valores novamente da ordem de 65 MPa.

3.2 – Fase de primeiro enchimento

Relativamente à Barragem de Pego do Altar, sabe-se que, durante o primeiro enchimento da albufeira (1949-1950), se mediram caudais de infiltração relativamente importantes através da cortina, devido a fissuração na união desta com o muro corta-águas e nas juntas de dilatação, o que motivou a necessidade de realizar reparações nestas uniões. Conhecem-se também os deslocamentos medidos no coroamento desta barragem entre o final da construção e Julho de 1954 (Palma Carlos, 1955). Nesse período, nos vértices de montante e de jusante do coroamento registaram-se assentamentos máximos da ordem de 30 cm e deslocamentos horizontais máximos para jusante de aproximadamente 20 cm.

Para as outras duas barragens de enrocamento lançado, Paradela e Vilar, não foi encontrada informação sobre deformações durante o primeiro enchimento.

Relativamente às barragens de enrocamento compactado, os valores dos deslocamentos medidos durante o primeiro enchimento foram, em geral, semelhantes aos previstos. Os assentamentos máximos no coroamento das barragens de Lagoacho, Apartadura, Odeleite e Arcossó foram de 1 cm, 2,8 cm, 5,6 cm e 5 cm, respectivamente. Na Barragem de Lagoacho, o primeiro enchimento processou-se com a manutenção de um patamar a cerca de 2/3 da altura durante um período de 4 a 5 semanas. Os cálculos do projecto previam um assentamento máximo de 0,8 cm e um deslocamento horizontal máximo de 1,2 cm no coroamento. No paramento de montante previam-se deslocamentos máximos normais à cortina da ordem de 2,5 cm a meia altura do corpo do aterro. Em termos gerais os deslocamentos medidos mantiveram-se dentro da ordem de grandeza dos valores previstos.

No que se refere à Barragem de Apartadura, nos cálculos de projecto previam-se deslocamentos máximos na cortina da ordem de 5 cm. O assentamento máximo medido no coroamento entre o final de construção do aterro, que ocorreu em Julho de 1992, e o fim do primeiro enchimento, em Fevereiro de 1995, foi de 2,8 cm.

O primeiro enchimento da Barragem de Odeleite verificou-se entre Maio de 1996 e Janeiro de 1998. A previsão efectuada, durante a fase de construção, para os assentamentos máximos durante o primeiro enchimento era de 6 cm. Os assentamentos máximos observados no coroamento foram da ordem de 5,6 cm (Fig. 4). Os deslocamentos horizontais nas marcas superficiais ocorreram na direcção de jusante (Fig. 5), o que traduz um andamento idêntico ao verificado no interior da barragem (Fig. 6). Na direcção margem esquerda/margem direita (Fig. 7) as marcas deslocaram-se para o centro do vale.

O primeiro enchimento da albufeira da Barragem de Arcossó decorreu entre Julho de 2000 e Janeiro de 2003, com um patamar a 2/3 do nível de pleno armazenamento mantido constante durante 3 meses. O projecto previa um deslocamento máximo no paramento de montante durante o enchimento de cerca de 25% do valor do assentamento máximo durante a construção, isto é, 5 cm.

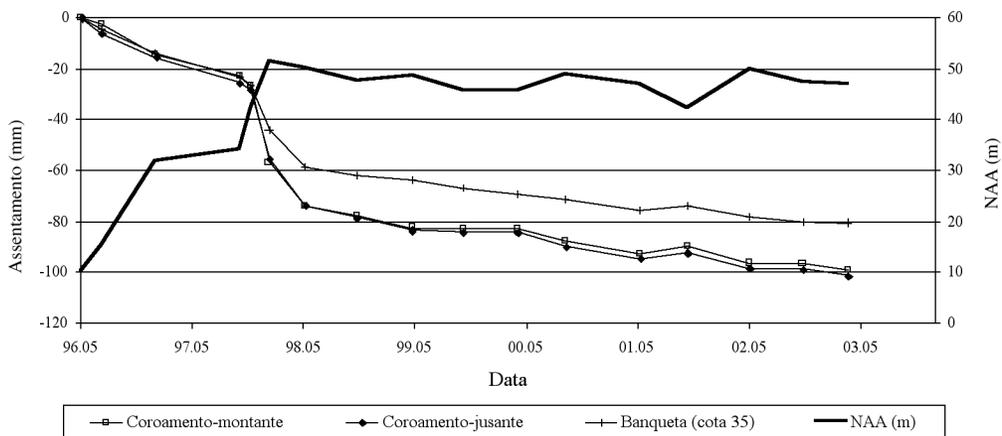


Fig. 4 – Barragem de Odeleite. Assentamentos medidos em marcas superficiais.

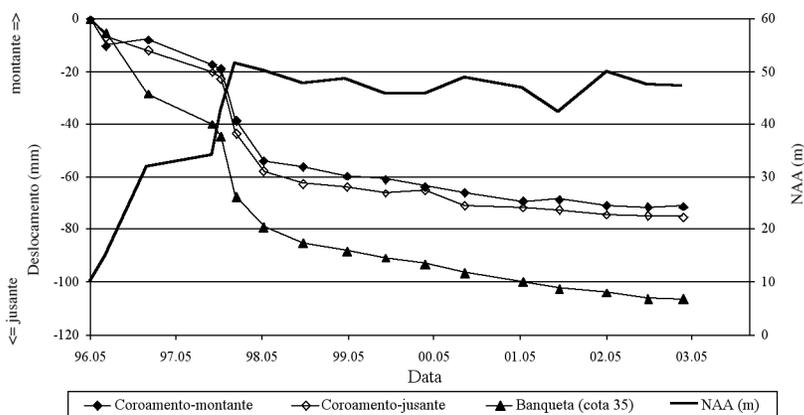


Fig. 5 – Barragem de Odeleite. Deslocamentos superficiais na direcção montante-jusante.

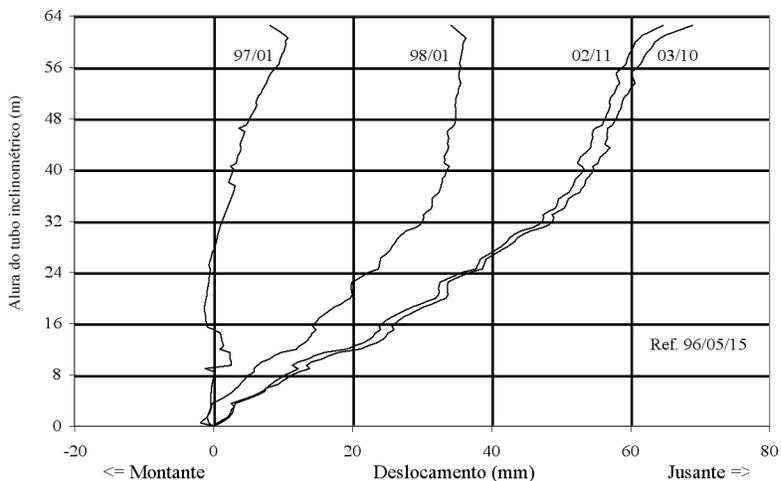


Fig. 6 – Barragem de Odeleite. Deslocamentos horizontais em inclinómetros subverticais.

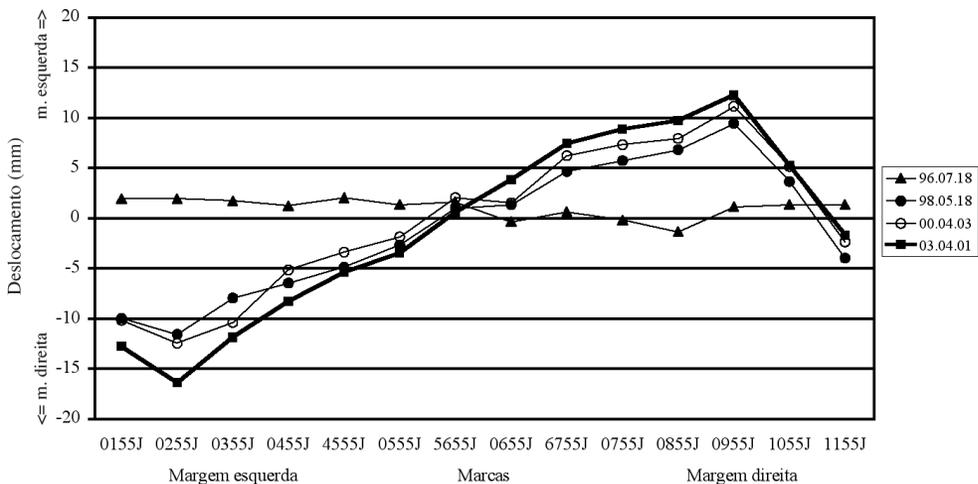


Fig. 7 – Barragem de Odeleite. Deslocamentos na direcção margem esquerda-margem direita.

Os deslocamentos máximos (Figs. 8 e 9) no coroamento durante o primeiro enchimento (cerca de 3 cm de deslocamento horizontal e de 5 cm de assentamento) foram desta ordem de grandeza. O deslocamento horizontal máximo medido nos inclinómetros na direcção montante-jusante foi também de cerca de 3 cm para jusante, a 2/3 da altura da barragem. Os deslocamentos na direcção margem esquerda-margem direita não excederam os 2 cm.

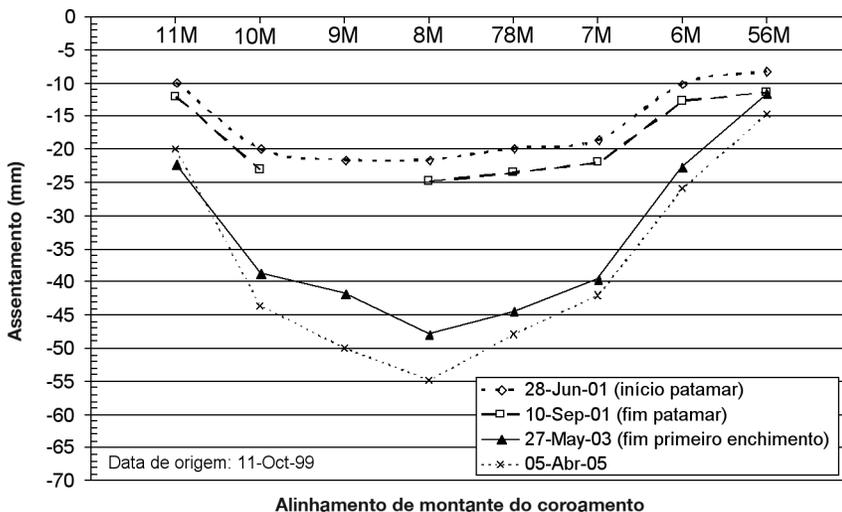


Fig. 8 – Barragem de Arcossó. Assentamentos superficiais no coroamento durante o primeiro enchimento e até 2005

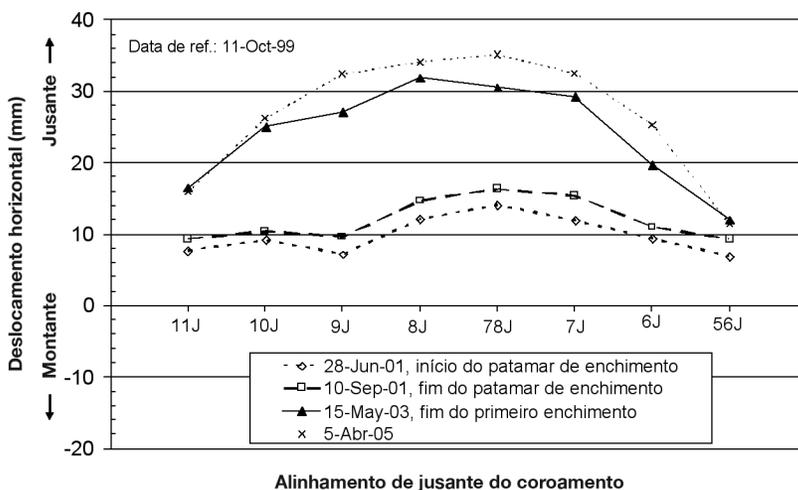


Fig. 9 – Barragem de Arcossó. Deslocamentos horizontais na direcção montante-jusante no coroamento durante o primeiro enchimento e até 2005

3.3 – Fase de exploração

Nas Barragens de Vilar e de Paradela, construídas com enrocamento lançado, apesar de ter passado um número considerável de anos desde a sua construção, continua a verificar-se uma taxa de assentamentos e deslocamentos horizontais significativa. Em ambas as barragens esta taxa parece manter-se constante nos últimos anos. De salientar que o LNEC só dispõe de resultados de medições de deslocamentos com datas de referência bastante posteriores à de início da exploração das barragens. Nestas duas barragens verificam-se valores relativamente elevados dos caudais infiltrados através da cortina de impermeabilização do paramento de montante, nomeadamente no caso de Paradela (entre 500 e 700 l/s medidos em 2004 no descarregador definitivo).

Nas Figs. 10 e 11 apresenta-se a evolução dos assentamentos em algumas das marcas mais representativas do comportamento do coroamento da Barragem de Vilar entre Novembro de 1983 e Janeiro de 2005. Observa-se neste período uma taxa anual de assentamentos de cerca de 1,9 mm/ano. A configuração dos assentamentos ao longo do coroamento é aproximadamente parabólica. Os deslocamentos horizontais ocorrem essencialmente no sentido de jusante, sendo máximos na zona central e com uma taxa de variação da ordem de 1,5 mm por ano. No que diz respeito à direcção margem esquerda/margem direita, os deslocamentos máximos são reduzidos e dirigidos para a zona central.

Na Fig. 12 apresenta-se a evolução no tempo dos assentamentos de 3 marcas superficiais da zona central do coroamento da Barragem de Paradela entre 1994 e 2004, tendo como referência a campanha de Dezembro de 1980. Observa-se que os maiores incrementos de assentamento ocorreram no Inverno, ou seja, nas épocas de maior pluviosidade. Os assentamentos máximos medem-se na zona central do aterro com uma taxa de cerca de 6 mm/ano (Fig.13). Relativamente aos deslocamentos horizontais no coroamento, na direcção montante-jusante, embora entre as diferentes campanhas ocorram oscilações significativas, observa-se um deslocamento médio anual de, aproximadamente, 3 mm para jusante. No que diz respeito à direcção margem esquerda-margem direita, a variação dos deslocamentos, orientados preferencialmente para o centro do vale, tem sido, nos últimos anos, pouco significativa.

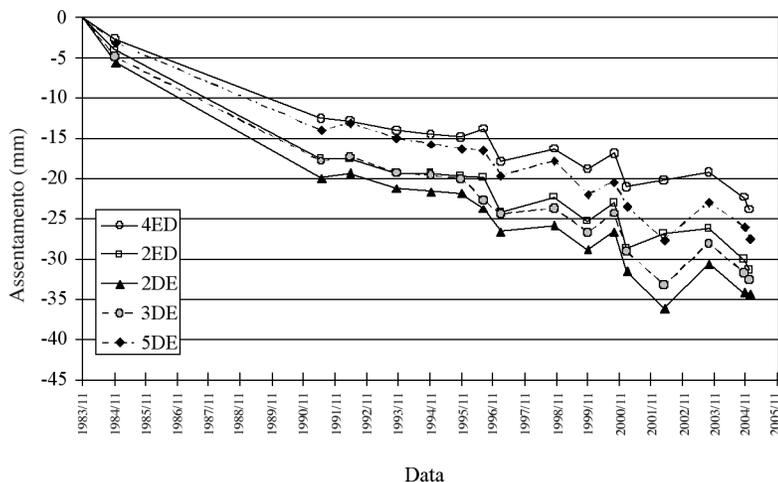


Fig. 10 – Barragem de Vilar. Evolução de assentamentos no coroamento.

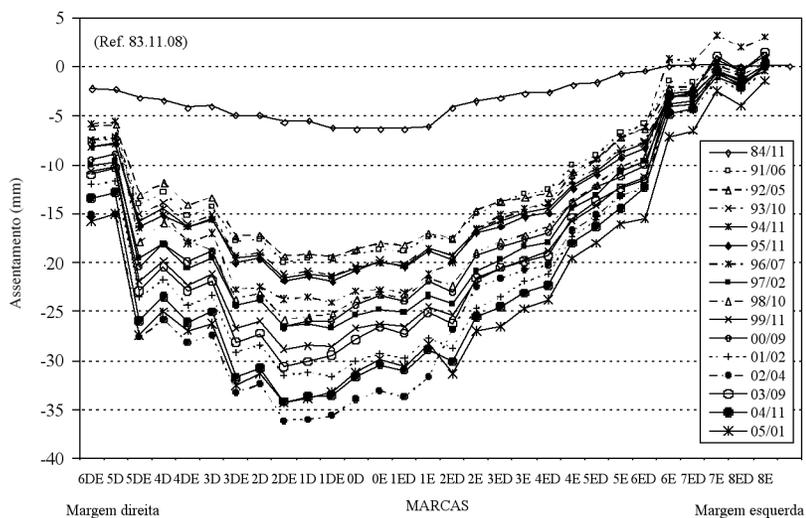


Fig. 11 – Barragem de Vilar. Distribuição de assentamentos no coroamento.

Nas barragens construídas com enrocamento compactado, os deslocamentos medidos durante a fase de exploração apresentam taxas anuais significativamente inferiores às das barragens de enrocamento lançado. Relativamente às previsões de projecto para este tipo de barragens durante a fase de exploração, no caso da Barragem de Arcossó, por exemplo, considerou-se um assentamento por fluência, em função do logaritmo do tempo, segundo a expressão (Sowers et al., 1965): $\Delta h_f = \alpha H \log(t_2/t_1)$, em que α é um parâmetro adimensional, H a altura máxima do aterro e os valores de t_1 e t_2 , o período, em anos, em que se determinaram os deslocamentos de fluência. No projecto desta barragem foi adoptado um valor de $\alpha = 0,6\%$, com o que resulta um assentamento por fluência de 41 cm em 50 anos. Nos dois primeiros anos após o final do primeiro enchimento, o incremento de assentamento no coroamento foi da ordem de 0,7 cm (Fig. 8).

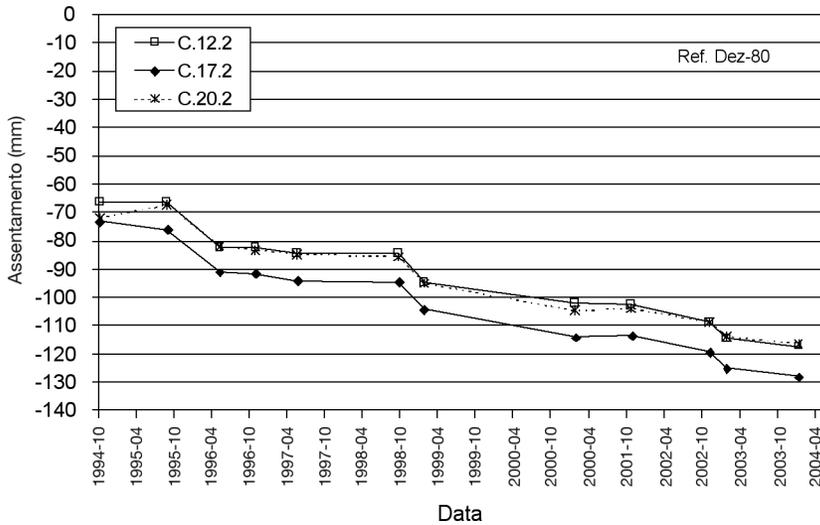


Fig. 12 – Barragem de Paradela. Evolução de assentamentos no coroamento

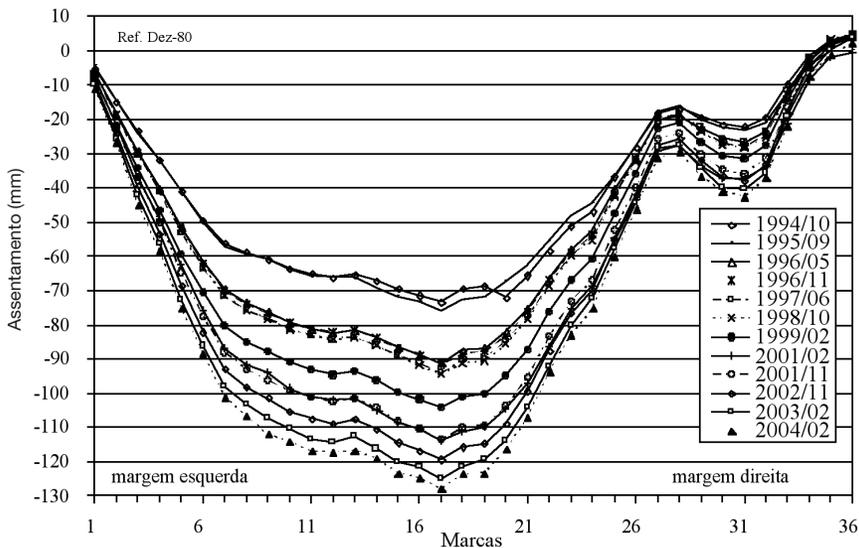


Fig. 13 – Barragem de Paradela. Distribuição de assentamentos no coroamento

Na Fig. 14 apresenta-se, junto com a evolução do nível de água na albufeira (NAA), a evolução dos assentamentos medidos em duas marcas situadas no coroamento da Barragem de Lagoacho. Os assentamentos superficiais máximos no coroamento determinados por geodesia em 2004 foram da ordem de 12 mm, no alinhamento de jusante, e de 16 mm, no alinhamento de montante, relativamente à campanha de referência de 1993. Os incrementos de assentamento são muito reduzidos desde 1998, nomeadamente no alinhamento de jusante. No alinhamento de montante observa-se uma certa oscilação sazonal, possivelmente influenciada pelas variações de temperatura. Os deslocamentos horizontais na superfície da barragem, bem como no interior do aterro, obtidos a partir da observação dos inclinómetros verticais, foram também pouco significativos entre 1993 e 2002. Em relação aos caudais medidos a jusante da barragem, nos últimos anos mantiveram-se inferiores a 5 l/s.

Para a Barragem de Apartadura admitia-se que os assentamentos no coroamento, durante a vida da obra, devido à fluência, pudessem ser da ordem de 0,3 a 0,4% da altura máxima do aterro, o que se traduziria por um valor de cerca de 15 a 20 cm. Relativamente ao fim do primeiro enchimento, e decorridos cerca de 11 anos, o assentamento máximo observado no coroamento foi da ordem de 8 a 9 mm (Fig. 15), o que traduz um bom comportamento estrutural do aterro.

A previsão de assentamentos a longo prazo para a Barragem de Odeleite foi efectuada após a observação dos deslocamentos na fase de primeiro enchimento. De acordo com esses resultados, adoptou-se uma expressão semelhante à referida para a Barragem de Arcossó, com um valor de $\alpha = 0,35\%$. Assim, após o primeiro enchimento, entre Fevereiro de 1998 e Maio de 2003, seria previsível obter-se $\Delta h_r = 14$ cm. Somando a este valor o medido no fim do primeiro enchimento (Fevereiro de 1998, ver Fig. 4), obtém-se uma previsão de assentamento para Maio de 2003, de 19 cm. Este valor é aproximadamente o dobro do máximo medido nesta data no coroamento (10 cm), o que leva à necessidade de ajustar o valor de α em face dos deslocamentos observados.

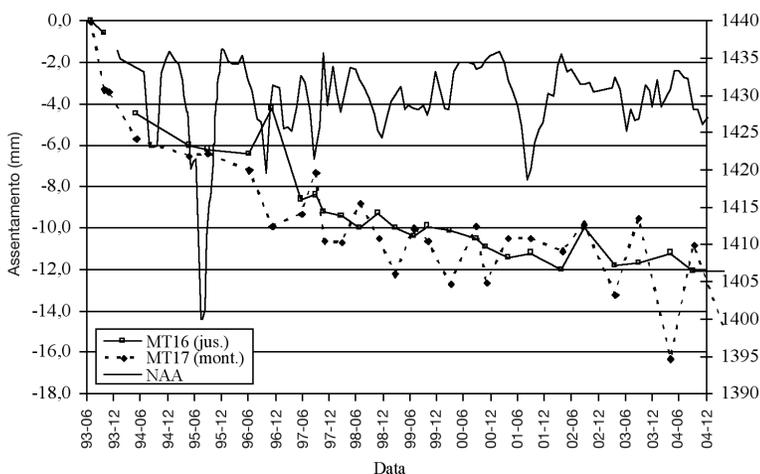


Fig. 14 – Barragem de Lagoacho. Evolução de assentamentos no coroamento.

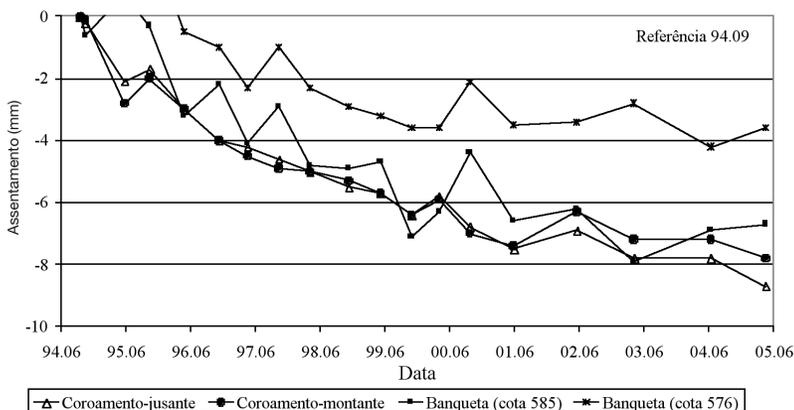


Fig. 15 – Barragem de Apartadura. Assentamentos superficiais.

4 – CONCLUSÕES

Foi apresentada uma breve descrição das barragens de enrocamento com cortina a montante existentes em Portugal, bem como alguns dos resultados mais relevantes relativos à observação das mesmas, nomeadamente das deformações. Foram referidas as grandes alterações no desempenho destas estruturas, nomeadamente em relação aos deslocamentos do aterro, quando se evoluiu do método de construção de enrocamento lançado para o enrocamento compactado com cilindros vibradores e com abundante adição de água. De referir que, em termos de segurança estrutural, o comportamento destas barragens, tanto as de enrocamento lançado como as de enrocamento compactado, é satisfatório. A ordem de grandeza dos deslocamentos é significativamente maior nas barragens de enrocamento lançado, o que deu lugar a danos nas cortinas de montante e, conseqüentemente, a maiores caudais de infiltração através das mesmas.

Atendendo às principais grandezas em análise e aos valores que estas podem assumir, é de salientar a importância, neste tipo de obras, de elaborar um adequado plano de observação, promover a instalação dos dispositivos atempadamente e realizar as campanhas de observação rigorosamente e de acordo com o previsto no plano. Em particular, a exactidão das leituras e a análise criteriosa dos dados, tendo em consideração os resultados das inspecções visuais, bem como o conhecimento de todos os eventuais incidentes e acidentes sofridos pelas barragens, é fundamental para avaliar o comportamento destas estruturas.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Charles, J. A. e Penman, A. D. M. (1988). The behaviour of embankment dams with bituminous watertight elements. *Proc. Seizième Congrès des Grands Barrages*, Q.61, R. 38, pp 693-705; San Francisco, Estados Unidos.
- Marsal, R. e Resendiz, D. (1975). *Presas de tierra y enrocamento*. Pub. Ed. Limusa; 546 p; México, D.F., México.
- Pagano, L. Desideri, A. e Vinale, F. (1998). Interpreting settlement profiles of earth dams. *Journal of Geotechnical and Environmental Engineering*, vol. 124, Nº 10, 923-932.
- Palma Carlos, A. (1955). Valeurs prévues et valeurs observées pour les tassements des enrochements du Barrage Salazar pendant et après sa construction. *V Congrès des Grands Barrages*; Paris, França.
- Pardo de Santayana, F. e Veiga Pinto, A. A. (2002). Comportamento estrutural da Barragem de Arcossó durante as fases de construção e primeiro enchimento. *Actas do XII COBRAMSEG*, vol. 2, 1049-1058; São Paulo, Brasil.
- Sowers, G., Williams, R. e Wallace, T. (1965). Compressibility of broken rock and the settlement of rockfills. *Proc. 6th ICSMFE*, vol. 2, pp. 561-565; Montreal, Canadá.
- Veiga Pinto, A. A. (1984). Considerações sobre barragens de enrocamento com cortina de impermeabilização a montante. *Geotecnia*, Nº 40, pp. 43-53; SPG, Lisboa, Portugal.
- Veiga Pinto, A. A. e Fortunato, E. (1998). The rockfill dams in Portugal. Behaviour and safety evaluations. *Int. Symposium on New Trends and Guidelines on Dam Safety*; Barcelona, Espanha.