

# CONSIDERAÇÕES SOBRE BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO A MONTANTE\*

## Considerations on rockfill dams with upstream impervious facing

por

A. VEIGA PINTO\*\*

RESUMO – Com vista à optimização do perfil tipo adoptado na barragem de Odeleite (barragem de enrocamento com cortina de betão armado a montante) analisou o autor a experiência acumulada em obras idênticas construídas nos tempos mais recentes. Resume-se essa análise em particular a evolução dos aspectos construtivos. Também se faz referência aos mecanismos que deram origem a deteriorações em barragens.

SYNOPSIS – For the purpose of optimizing the profile to be adopted for the Odeleite dam (rockfill dam with upstream reinforced concrete facing), the author analysed the experience that has been acquired in similar works. In the present paper that analysis is summarized, particular attention being given to the evolution of construction techniques. Mechanisms that brought about deterioration are reported too.

## 1 – INTRODUÇÃO

A propósito da elaboração do projecto da barragem de Odeleite<sup>(1)</sup> teve o autor oportunidade de analisar com certo detalhe as diferentes soluções adoptadas no perfil tipo de barragens de enrocamento com cortinas de impermeabilização a montante.

Por se julgar que teria interesse a sua divulgação no meio técnico, quer a título de informação, quer como matéria susceptível de discussão apresentam-se seguidamente algumas considerações sobre o assunto.

---

\* Projecto realizado pela Hidroprojecto para a D.G.R.A.H.  
Manuscrito recebido em Março de 1984. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

\*\* Especialista em Geotecnia (LNEC).

## 2 – ANÁLISE DA EXPERIÊNCIA DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO A MONTANTE

A escolha da solução dum dado tipo de barragem depende, entre outros factores, principalmente da morfologia do local, fundações e materiais de empréstimo. Na realidade cada tipo de solução (betão, terra e enrocamento) possui determinados requisitos mais apropriados para certas condições, reflectindo-se nos aspectos económicos.

Num trabalho publicado pela Comissão de Grandes Barragens de Espanha, Alejandro Del Campo (1976) analisou a experiência da construção de barragens, tendo considerado que o período em que se construiu em Espanha maior número de barragens de betão, relativamente às demais soluções, verificou-se na década de 50. Na realidade, após essa data, o desenvolvimento tecnológico que permitiu o fabrico de máquinas de escavação, transporte e compactação conduziu a uma substancial redução do custo das barragens de aterro. Assim Alejandro Del Campo (op. cit.) previa que na década de 75-85 se verificaria em Espanha um desenvolvimento ainda mais acentuado, do que até aquela data, na construção de barragens de terra e enrocamento.

Os princípios básicos que devem orientar a concepção de uma barragem de enrocamento com cortina a montante são: obter-se um maciço estabilizador, pouco deformável e uma cortina impermeável que suporte determinadas deformações sem exhibir fissurações. Dever-se-á pois conceber um determinado zonamento do maciço e características de materiais que permitam reduzir ao mínimo as deformações junto à cortina. Para apoio a este estudo já se dispõe de ferramentas (ensaios laboratoriais, modelos de cálculo e métodos numéricos) que permitem realizar análises de previsão das deformações de barragens de aterro (Veiga Pinto, 1983). No entanto dificuldades na modelação ainda não permitem simular eficazmente a interacção cortina-maciço de enrocamento pelo que sobretudo no dimensionamento da cortina se tem apoiado mais na experiência do comportamento de obras semelhantes, incluindo as deteriorações. Veja-se a exemplo o estudo conduzido no Norwegian Geotechnical Institute para a barragem de Storvass (Soydemir e Kjaernsli, 1975).

Na escolha da solução óptima para a barragem de Odeleite foram particularmente tidos em consideração aspectos como: inclinação dos paramentos, tipo de cortina, ligação da cortina à fundação (plinto ou galeria perimetral), características dos materiais de empréstimo e compactação, etc. Desse modo, fez-se uma análise exaustiva da experiência obtida na construção de barragens semelhantes. No Quadro 1 resumem-se algumas particularidades das barragens analisadas. Interessantes conclusões podem ser retiradas da análise desse Quadro as quais se relacionam com a história da construção de barragens de enrocamento com cortina a montante. Assim:

- a) a inclinação adoptada para os paramentos manteve-se aproximadamente constante ao longo do tempo;
- b) as cortinas de betão armado foram as primeiras utilizadas, tendo-se adoptado as de betão betuminoso sobretudo na década de 50. Recentemente porém há tendência novamente para usar as primeiras soluções;
- c) após uma fase inicial em que não se utilizaram galerias perimetrais de inspecção, esta solução passou a ser adoptada maciçamente, havendo no entanto actualmente tendência para a sua substituição por um plinto;
- d) os acidentes ocorreram sobretudo nas primeiras barragens construídas e quando os enrocamentos não eram compactados com cilindros vibradores.

Analise-se um pouco mais detalhadamente porque se evoluiu da cortina de betão armado e plinto para betão betuminoso e galeria perimetral e novamente para as primeiras soluções.

Como se pode ver no Quadro 1, nas primeiras barragens deste tipo os enrocamentos eram somente compactados pelo efeito do lançamento dos blocos, por vezes de grande altura, e da acção de jactos de água. Além disso, era comum construir a cortina ao mesmo tempo que evoluía a altura do aterro. Deste modo, os estados de compacidade obtidos eram relativamente soltos, conduzindo a deformações bastante apreciáveis do maciço de enrocamento e consequentemente da cortina. Como nessa altura se adoptaram cortinas rígidas de betão armado era necessário que estas dispusessem um elevado número de juntas (verticais e horizontais). Mesmo assim verificou-se frequentemente infiltrações excessivas e a necessidade de realizar reparações.

Desse modo, procuraram-se logicamente outros materiais para a cortina os quais pudessem, sem fissurar, suportar as elevadas deformações do aterro. Atingiu-se pois a época das cortinas flexíveis de betão betuminoso que se vieram a comportar com elevado sucesso.

Simultaneamente, como o maior número de acidentes se verificou na ligação entre a cortina e o plinto, optou-se também, de uma maneira lógica, pela sua substituição por uma galeria perimetral. Esta permitia, em caso de rotura, localizar a zona acidentada injectar eventualmente a fundação rochosa sem esvaziar a albufeira. Podia ainda permitir a observação das condições de percolação na fundação e efectivação de drenagem. No entanto, atingia-se então os meados da década de 60, altura em que se generalizava a aplicação do equipamento que originou o maior desenvolvimento tecnológico na construção de aterros designadamente os de enrocamento: os cilindros vibradores. Por esse motivo, e também porque se começou a construir as cortinas a montante somente após a conclusão da construção do aterro, verificou-se que as

QUADRO I

**BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM CORTINA A MONTANTE**

Nome (País)	Ano	Altura (m)	Larg. Coroa (m)	Inclin. par. mont.	Inclin. par. jus.	Tipo de Cortina	Base da Cortina	Enrocamento	Acidentes com Reparação
Dormico (Espanha)	1905	20	10	1 : 1	1,2 : 1	LEV	—	Laçado	Infiltração excessiva
Dix River (USA)	1925	81	6	1,1 : 1	1,4 : 1	BA-JVH	F	Laçado	Infiltração excessiva
Urdicato (Espanha)	1930	23	5	1 : 1	1,4 : 1	BA-JVH	F	Laçado	Infiltração excessiva
Salt Springs (USA)	1931	100	5	1,3 : 1	1,4 : 1	BA-JVH	F	Laçado	Infiltração excessiva
Cogswell (USA)	1934	83	—	1,3 : 1	1,4 : 1	BA-JVH	F	Laçado	—
Poço do Altar (Portugal)	1949	62	5	1,3 : 1	1,4 : 1	Aço	GF	Laçado	—
Lower Beer N.º 1 (USA)	1952	75	6	1,3 : 1	1,4 : 1	BA-JVE	F	Laçado	—
Genkel (RFA)	1952	43	—	2,3 : 1	1,5 : 1	BB	—	CCV	—
Iril Imda (Argélia)	1954	75	—	1,6 : 1	1,5 : 1	BB	—	CCV	—
Cadena (Espanha)	1954	17	4	1 : 1	1 : 1	LVB	F	Laçado	—
Paradela (Portugal)	1956	110	8	1,3 : 1	1,3 : 1	BA-JVE	GP	Laçado	Infiltração excessiva
Lago Negro (Espanha)	1956	11	2	0,8 : 1	1,5 : 1	BA-JVB	F	Laçado	—
Pias (Espanha)	1956	34	7	1,3 : 1	1,9 : 1	BA-JVE	GP	CCV	—
Wisbon (EUA)	1958	79	—	1,3 : 1	1,4 : 1	BA-JVH	F	Laçado	Infiltração excessiva
Aguada Blanca (Peru)	1962	45	5	1,7 : 1	1,4 : 1	Aço	F	CCV	—
Karaoun (Libano)	1963	66	9	1,3 : 1	1,1 : 1	BA-JVH	GP	Laçado	—
Venemo (Noruega)	1963	51	—	1,7 : 1	1,4 : 1	BB	F	CCV	—
L'Alesani (França)	1965	63	5	1,7 : 1	1,4 : 1	BB	GP	CCV	—
New Exchenquer (USA)	1966	150	6	1,4 : 1	1,4 : 1	BA-JVH	F	CCV	Infiltração excessiva
Candes (França)	1967	44	6	1,6 : 1	1,3 : 1	BA-JVH	P	CCV	—

QUADRO I

**BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM CORTINA A MONTANTE (Continuação)**

Nome (País)	Ano	Altura (m)	Larg. Coroa (m)	Inclin. par. mont.	Inclin. par. jus.	Tipo de Cortina	Base da Cortina	Enrocamento	Acidentes com Reparação
S. C. d'Andorage (França)	1967	45	6	1,7 : 1	1,4 : 1	BB	CP	CCV	—
Piedras (Espanha)	1967	40	6	1,3 : 1	1,3 : 1	BA-JV	P	CCV	—
Kangroo Creek (Australia)	1968	64	6	1,3 : 1	1,4 : 1	BA-JV	P	CCV	—
Pades (França)	1968	68	6	1,3 : 1	1,3 : 1	BA-JVH	P	CCV	—
Almendra (Espanha)	1968	30	4	1,8 : 1	1,3 : 1	BB	GP	CCV	—
Santillana (Espanha)	1968	37	7	1,8 : 1	1,4 : 1	BB	GP	CCV	—
Salagou (França)	1969	57	7	1,5 : 1	1,3 : 1	BB	GP	CCV	—
Rama (Jugoslávia)	1969	100	6	1,2 : 1	1,5 : 1	BA-JVH	GP	CCV	—
Lago Verde (Itália)	1970	53	8	0,9 : 1	1,3 : 1	Aço	GP	Laçado	Infiltração excessiva
Aboño (Espanha)	1970	22	6	2,2 : 1	2,6 : 1	BB	GP	CCV	—
Cathama (Australia)	1971	110	9	1,3 : 1	1,3 : 1	RA-JV	F	CCV	—
Gajaraz (Espanha)	1972	48	8	1,8 : 1	1,3 : 1	BB	GP	CCV	—
Serra Boyera (Espanha)	1973	32	6	1,3 : 1	1,3 : 1	BA-JV	GP	CCV	—
Undurraga (Espanha)	1973	33	7	1,8 : 1	1,4 : 1	RA-JV	GP	CCV	—
Los Campitos (Espanha)	1974	54	12	1,4 : 1	1,4 : 1	BA-JVH	P	CCV	Infiltração excessiva
El Tejo (Espanha)	1974	40	6	1,3 : 1	1,4 : 1	RA-JV	GP	CCV	—
Valmayor (Espanha)	1974	60	9	1,8 : 1	1,4 : 1	BB	GP	CCV	—
Siberio (Espanha)	1980	70	11	1,3 : 1	1,4 : 1	BB	GP	CCV	—
Storvass (Noruega)	1980	80	4	1,3 : 1	1,3 : 1	RA-JV	P	CCV	—
Foz da Areia (Brasil)	1980	160	12	1,4 : 1	1,4 : 1	RA-JV	P	CCV	—

LEV - Laje espessa de betão

BA - Betão armado

BB - Betão betuminoso

JVH - Juntas verticais e horizontais

JV - Juntas verticais

CCV - Compactado com cilindro vibrador

P - Plinto

GP - Galeria perimetral

deformações da cortina passaram a ser bastante reduzidas. Desse modo, as deteriorações em barragens deste tipo tornaram-se pouco significativas, justificando-se agora que a galeria perimetral pudesse ser dispensada, sobretudo dado o seu custo, e se retomassem as lajes em betão armado que já exibiam um comportamento satisfatório para aquele nível de deformação. Neste sentido reduziu-se substancialmente a necessidade das juntas nas cortinas de betão armado. As horizontais foram eliminadas (excepto a perimetral) e as verticais passaram a não ter material de enchimento. Muito recentemente foi mesmo referida a tendência para a armadura de aço atravessar as juntas verticais (USA COMMITTEE ON LARGE DAMS, 1982).

Refira-se a propósito que para a citada barragem de enrocamento de Storvass (Soydemir e Kjaernsli, 1975) os autores de projecto, após terem considerado uma solução com cortina de betão armado a montante, optaram por uma cortina de betão betuminoso, com uma espessura variável de 0,80 a 0,50 m e localizada na zona central da barragem. A Fig. 1 diz respeito à construção da barragem em finais de 1983 (Venkatachalam, 1984).

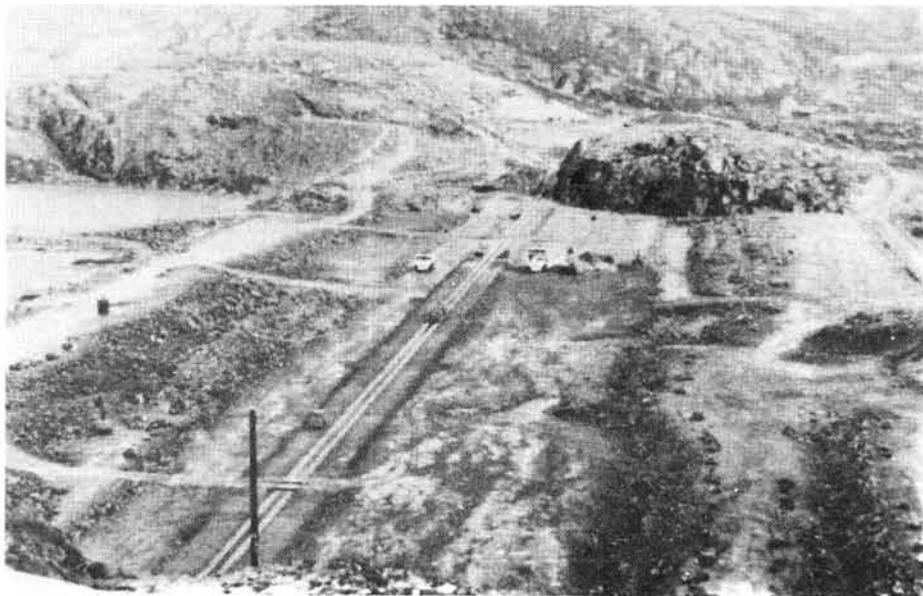


Fig. 1 – Barragem de Storvass durante a construção (Venkatachalam, 1984)

Este facto demonstra a elevada confiança que aqueles técnicos depositaram na análise do comportamento mecânico dos materiais de enrocamento e nos reduzidos assentamentos, ao considerarem um sistema de impermeabilização que dificilmente poderá ser reparado caso ocorram fissurações ou infiltrações.

Compreende-se assim que, mais recentemente ainda, Gordon (1983), num estudo sobre a quantidade e o tipo das futuras barragens em todo o mundo, tenha realçado serem precisamente as de enrocamento com cortina de betão armado a montante aquelas a que seria dedicada mais atenção, tendo previsto que, a curto prazo, se ultrapasse a altura máxima deste tipo de barragem, que neste momento é de 160 m (Foz do Areia; Pinto et al., 1982). Mas é interessante analisar um pouco mais em pormenor as vantagens e inconvenientes da solução em betão betuminoso relativamente à solução betão armado. A principal vantagem da primeira reside na sua maior flexibilidade rapidez e economia das reparações. No entanto, tem os seguintes inconvenientes:

- a)* um envelhecimento superficial devido aos agentes atmosféricos mais acentuado. Este facto levou, por vezes, a proteger as cortinas de betão betuminoso com material de aterro, como por exemplo na barragem de Vale do Gaio;
- b)* uma maior dificuldade de construção, controlo das suas propriedades físico-mecânicas e manutenção;
- c)* requer um maior volume de aterro, pois por aspectos construtivos necessita de um paramento de montante de inclinação mais suave;
- d)* está normalmente associada a uma galeria perimetral, órgão este que tem um peso cada vez mais acentuado nos custos.

Como em Portugal não há experiência na construção de cortinas de betão betuminoso, que requer uma tecnologia relativamente sofisticada, está-se numa situação idêntica à do Brasil. Nesse caso, segundo opinião expressa recentemente por Victor de Mello (1975) haveria que adjudicar uma obra «chave na mão», com responsabilidade integral do projecto, fornecimento, inspecção, construção e comprovação operacional da cortina de betão betuminoso, a uma firma com experiência comprovada e portanto estrangeira.

### 3 – MECANISMOS QUE CONDUZIRAM A DETERIORAÇÕES NAS BARRAGENS DE ENROCAMENTO COM CORTINA DE IMPERMEABILIZAÇÃO A MONTANTE

Analise-se, ainda que sucintamente, as causas das deteriorações de barragens de enrocamento com cortina a montante. Para isso, consultou-se o relatório elaborado pela Comissão de Deteriorações de Barragens e Albufeiras da ICOLD (1979) que refere 1105 casos de deteriorações de barragens de todos os tipos (com altura superior a 15 m), correspondentes a uma amostragem de 14 500 barragens construídas, em todo o Mundo, até 1975.

Dos 1105 casos, 96 referem-se a barragens de enrocamento. Quase metade (44%), ocorreram nos órgãos de descarga ou de desvio.

Excluindo os relacionados com os órgãos hidráulicos, no citado relatório referem-se 17 casos de deteriorações em barragens de enrocamento com cortina a montante, que se passam a analisar.

O maior número (14) deve-se a perda de funcionalidade da cortina. Os 3 restantes (Woodruff Narrows, USA; San Ildefonso, México e Los Campitos, Espanha) resultaram de erosão interna e percolação excessiva através da fundação ou maciço natural que envolve a albufeira.

As 14 deteriorações verificadas na cortina foram devidas às seguintes causas:

a) grande parte (10 casos) resultaram de excessivo assentamento do maciço de enrocamento e consequentemente da cortina. No entanto, excepto numa barragem, o aterro de enrocamento tinha sido construído com lançamento de blocos e também quase na totalidade as cortinas eram rígidas (betão armado):

- Dix River (USA, 1925)
- Salt Springs (USA, 1931)
- Cogswell (USA, 1934)
- Portillon (França, 1950)
- Paradela (Portugal, 1956)
- Wishon (USA, 1958)
- Courtright (USA, 1958)
- New Exchenquer (USA, 1966; compactação com cilindros vibradores)
- Muda (Malásia, 1969; cortina de betão betuminoso)
- Nyrsko (Checoslováquia, 1970)

- b)* deficiente funcionamento duma cortina em aço devido às acções de temperatura;
- Lago Verde (Itália, 1970)
- c)* assentamento excessivo da fundação aluvionar, com fissuração da cortina de betão armado:
- Guadalupe (México, 1943)
- d)* deficiência da cortina de betão betuminoso em barragens de enrocamento pouco deformáveis, compactadas com cilindros vibradores:
- Scotts Peak (Austrália, 1973)
  - Miraflores (Espanha, 1976)

Salientem-se as principais conclusões deste estudo:

- a)* o maior número de deteriorações ocorreu nas primeiras barragens em que não se utilizaram as actuais técnicas de compactação com cilindros vibradores e a cortina era construída ao mesmo tempo que o maciço crescia em altura. As barragens exibiam comportamentos estruturais completamente distintos dos das actuais, não sendo portanto correcto extrapolar os ensinamentos de umas para as outras.
- A título de exemplo, refira-se que da utilização de modelos elásticos não lineares na caracterização dos materiais e o método dos elementos finitos, se concluiu que a cortina de betão armado adoptada na barragem de Odeleite deverá estar sujeita a uma deformação normal à cortina da ordem dos 5 cm ao final do primeiro enchimento, ou seja 0,08% da sua altura. Na barragem de Paradela para o mesmo período de funcionamento a cortina deslocou-se, de acordo com a observação (Fernandes et al., 1960), 205 cm, ou seja 1,8% da sua altura. Deste modo, poder-se-á considerar, em primeira aproximação, que a cortina de betão armado da barragem de Paradela sofreu uma deformação cerca de 20 vezes superior à que será submetida a barragem de Odeleite;
- b)* não se verificou ainda qualquer deterioração em barragens deste tipo devido à instabilização por escorregamento dos maciços estabilizadores de enrocamento;
- c)* caso seja permitida uma fundação aluvionar sob o maciço de enrocamento, deve exibir módulos de deformabilidade e estar localizada em zonas que não afectem a deformação da cortina;
- d)* nestas barragens devem ser analisados com cuidados especiais os aspectos construtivos da cortina.

#### 4 – CONCLUSÕES

As considerações apresentadas conduzem a que nas actuais barragens sejam adoptadas as seguintes soluções básicas e operações:

- a) maciço de enrocamento com reduzido índice de vazios (pouco deformável);
- b) cortina de betão armado;
- c) a dispensa da galeria perimetral;
- d) a eliminação das juntas horizontais, excepto a perimetral e construção de juntas verticais sem espaçamento;
- e) a colocação da cortina após o aterro estar completamente construído;
- f) a rega do material de enrocamento durante a fase de compactação com cilindros vibradores;
- g) O estudo sobre a influência da deformabilidade da fundação aluvionar nas deformações da cortina.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEJANDRO DEL CAMPO (1976) — «El tipo de presa de acuerdo com los condicionantes físicos y la evolucion tecnico-económica», in *Grandes Presas, Experiências Españolas en su Proyecto y Construcion*, Madrid, pp. 131-143.
- BRAZILIAN COMMITTEE ON LARGE DAMS (1982) — «Foz do Areia», in *Main Brazilian Dams, Design, Construction and Performance*, contribution to the 14<sup>th</sup> ICOLD, Rio de Janeiro, pp. 111-153.
- CHAYA, E. e SOUBRA, A. (1964) — «Deformation du barrage de Karaoun», 8<sup>th</sup> ICOLD, Vol. 2, pp. 377-391.
- COMBEAU, P.; LASSAGNE, J. e ROBERT, M. (1967) — «Le barrage de Candes», *Travaux*, Sept., pp. 89-100.
- DELORD, P. e HONORÉ, P. (1967) — «Le barrage de Salagou», *Travaux*, Sept., pp. 143-152.
- FERNANDES, G.; OLIVEIRA, E. e PORTO, V. (1960) — «Barragem de Paradela», 1.<sup>as</sup> Jornadas Luso-Brasileiras de Engenharia Civil, pp. 1-26.
- GOOD, R.J. (1976) — «Kangaroo Creek dam use of a weak schist as rockfill for a concrete faced rockfill dam», 12<sup>th</sup> ICOLD, vol. 2, pp. 645-665.
- GORDON, J.L. (1983) — «Recent developments in hydropower», *Water Power and Dam Construction*, Sept., pp. 21-23.
- ICOLD (1979) — «Deterioration cases collected and their preliminary assessment», *Committee on Deterioration of Dams and Reservoirs*, 2 vol.
- MOP (1973) — «Comentário sobre las presas de materiales sueltos com pantalla en España», *Contribution to the 11<sup>th</sup> ICOLD*, Madrid.
- PAVLOVIC, M. e KATALINIC, I. (1970) — «Rockfill dam Rama», 10<sup>th</sup> ICOLD, vol. 3, pp. 703-721.
- SEMBENELLI, P. (1974) — «Aguada Blanca rockfill dam with metal facing», *Journal of the Geotechnique Engineering Division*, GT1, Jan., pp. 31-51.
- SOYDEMIR, C. e KJAERNSLI, B. (1975) — «A treatise on the performance of rockfill dams with unyielding foundations in relation to the design of Storvass dam», *NIG*, Oslo, pp. 1-25.
- USA COMMITTEE ON LARGE DAMS (1972) — «General Paper», 14<sup>th</sup> ICOLD, vol. 3, pp. 729-755.

- VEIGA PINTO, A. (1983) — «Previsão do comportamento estrutural de barragens de enrocamento», Tese para especialista, LNEC, pp. 1-157.
- VENKATACHALAM, K. (1984) — «Report fellowship training in Norway, W. Germany and Portugal», LNEC, Lisboa, pp. 1-105.
- VICTOR DE MELLO (1975) — «Dispositivos de impermeabilização de barragens de enrocamento e apreciação simultânea de protecção de taludes», Geotecnia n.º 14, Lisboa, pp. 23-51.
- VILLEMAGNE, M. e BOURRIOT, R. (1967) — «Le barrage de Saint Cécile D'Andorage», Travaux, Sept., pp. 123-134.
- WILKINS, J.; MITCHELL, W.; FITZPATRICK, M. e LIGGINS, T. (1973) — «The design of Cethana concrete face rockfill dam», 11<sup>th</sup> ICOLD, vol. 3, pp. 25-43.