

DIAGNÓSTICO E REABILITAÇÃO DE BARRAGENS AFETADAS POR REAÇÕES EXPANSIVAS DO BETÃO

António Lopes Batista & José Piteira Gomes
Investigadores

Departamento de Barragens de Betão
Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)
Lisboa, Portugal

SEMINÁRIO

Barragens no espaço da CPLP
experiências, soluções e desafios

Maputo, Auditório da Direcção Nacional de Águas
17 e 18 de Novembro de 2014

Sumário

- ❖ Causas e efeitos das reações expansivas
- ❖ Síntese das técnicas de reabilitação
- ❖ Barragens portuguesas afetadas, casos particulares de Santa Luzia, Alto Ceira e Pracana
- ❖ Barragem de Cahora Bassa
- ❖ Barragem da Matala em Angola
- ❖ Barragem de Kariba no rio Zambeze
- ❖ Intervenção na barragem de Pian Telessio (Itália)
- ❖ Notas finais

Desde quando se conhecem?



Em 1940 Thomas Stanton identificou, pela primeira vez, as reações expansivas e os seus efeitos, em viadutos na Califórnia

A engenharia portuguesa de barragens deparou-se com esta questão na década de 1980, no LNEC, com os casos das barragens de Pracana, Alto Ceira e Cahora Bassa



Tipo de reações

- ❖ Reação álcalis-sílica (RAS): desenvolve-se um gel sílico-alcalino, expansivo, resultante da reação entre os álcalis do cimento, a água e a sílica (com estrutura cristalina “mal” organizada) dos agregados
- ❖ Reação sulfática interna (RSI): temperaturas elevadas dão origem à formação de etringite secundária (DEF) que, na presença de água, é expansiva.

Evidências das reações expansivas

- ❖ **Efeitos nas juntas:** fecho generalizado, esmagamento de preenchimentos, deslizamentos entre blocos (desalinhamentos no coroamento)
- ❖ **Efeitos nos vãos (condutas, orifícios e descarregadores):** ovalização de condutas, fecho e distorção de orifícios e encravamento de comportas
- ❖ **Fendilhação superficial:** difusa e generalizada, devida à heterogeneidade local, e linear, devida à resposta estrutural a deformações impostas
- ❖ **Produtos da reação:** a RAS produz geles que podem exsudar nas superfícies aparentes, em geral em cavidades, fendas e juntas

Técnicas de reabilitação

- ❖ Impermeabilização de paramentos: para evitar a entrada da água, que alimenta a reação
- ❖ Cortes estruturais: para aliviar tensões e recuperar deslocamentos progressivos
- ❖ Reforços estruturais com fibras, barras e cabos: para ligar, cintar e confinar zonas deterioradas ou previamente cortadas
- ❖ Injeção de fendas e zonas cortadas (calda de cimento e resinas): para restabelecer a continuidade estrutural

Estas técnicas são muitas vezes usadas em conjunto, para solucionar os problemas de forma integrada

Grandes barragens de betão afetadas em Portugal (19)

Barragem	Tipo estrutural	Altura (m)	Ano de conclusão
Santa Luzia	Abóbada	76	1942
Alto Ceira I	Abóbada	36	1949
Penide	Descarregadora	18	1949
Castelo do Bode	Arco gravidade	115	1951
Pracana	Contrafortes	60	1951
Venda Nova	Arco gravidade	97	1951
Belver	Descarregadora	21	1952
Covão do Meio	Abóbada	28	1953
Salamonde	Abóbada	75	1953
Cabril	Abóbada	132	1954
Bouça	Abóbada	65	1955
Caniçada	Abóbada	76	1955
Bravura	Abóbada	41	1958
Picote	Abóbada	100	1958
Miranda	Contrafortes	80	1961
Alto Cávado	Gravidade	29	1964
Alto Rabagão	Abóbada	94	1964
Bemposta	Arco gravidade	87	1964

Barragem	Tipo estrutural	Altura (m)	Ano de conclusão
Caia	Contrafortes	52	1967
Roxo	Contrafortes	49	1968
Carrapatelo	Descarregadora	57	1972
Odivelas	Abóbadas múltiplas	55	1972
Vilarinho das Furnas	Abóbada	94	1972
Fratel	Descarregadora	43	1973
Régua	Descarregadora	42	1973
Valeira	Descarregadora	48	1975
Varosa	Abóbada	76	1976
Penha Garcia	Gravidade	25	1980
Coimbra	Descarregadora	40	1981
Raiva	Gravidade	36	1981
Aguieira	Abóbadas múltiplas	89	1981
Monte Novo	Gravidade	30	1982
Pocinho	Descarregadora	49	1982
Fagilde	Gravidade	27	1984
Fronhas	Abóbada	62	1984
Crestuma	Descarregadora	65	1985

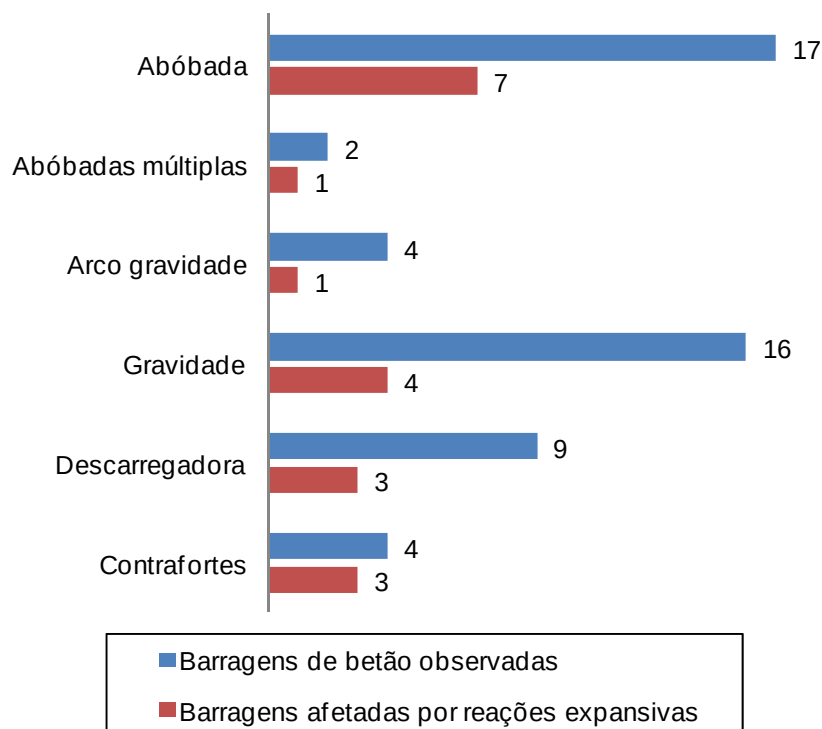
Barragem	Tipo estrutural	Altura (m)	Ano de conclusão
Ranhados	Gravidade	41	1986
Torrão	Gravidade	70	1988
Corgas	Gravidade	25	1991
Funcho	Abóbada	49	1991
Alto Lindoso	Abóbada	110	1992
Caldeirão	Abóbada	39	1993
Touvedo	Gravidade	43	1993
Sordo	Gravidade	36	1997
Catapereiro	Arco gravidade	48	1999
Alqueva	Abóbada	96	2002
Bouçoais-Sonim	Gravidade	43	2004
Rebordelo	Gravidade	36	2004
Pedrógão	Gravidade	43	2005
Ferradosa	Gravidade	34	2008
Olgas	Gravidade	35	2009
Pretarouca	Gravidade	29	2009



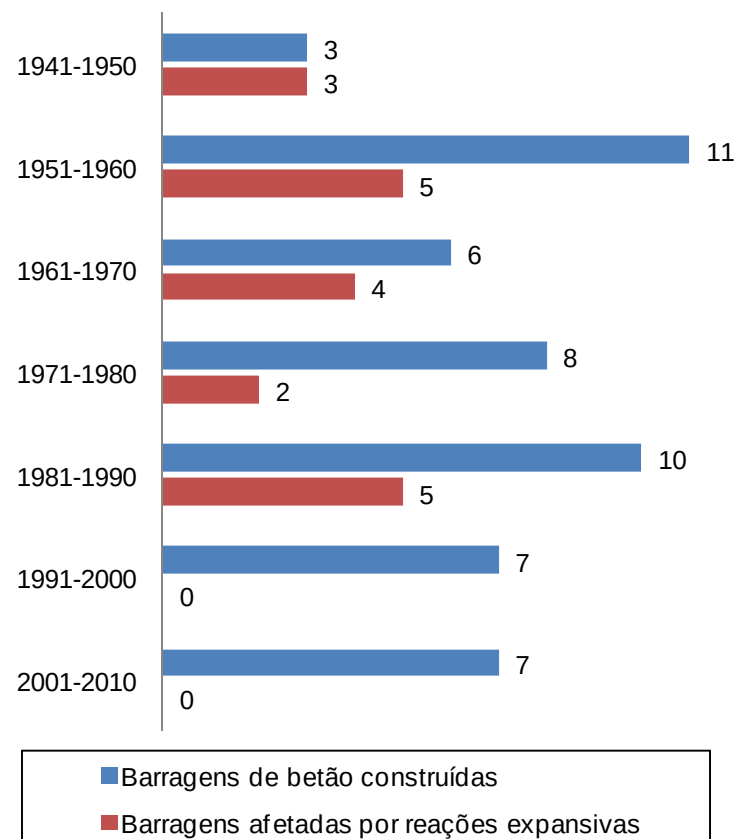
Barragens portuguesas afetadas por reações expansivas

Barragens de betão observadas (52) e afetadas por reações expansivas (19)

Organização por tipo estrutural



Organização por idade



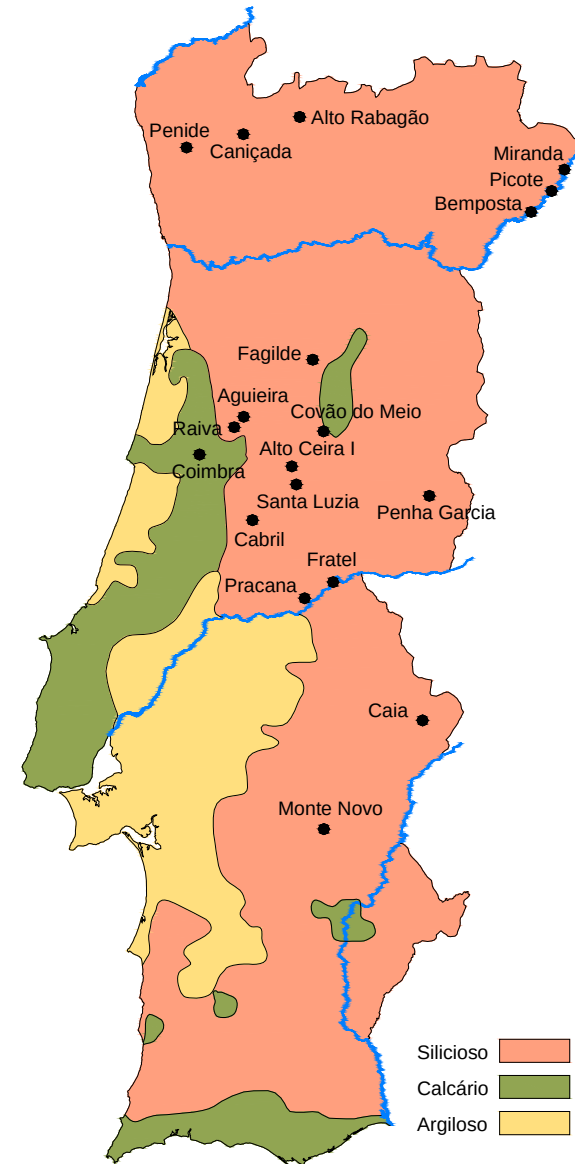
Não há sinais de processos expansivos nas barragens construídas nos últimos 30 anos

Barragens portuguesas afetadas por reações expansivas

Formações geológicas predominantes em Portugal

e

Localização das barragens de betão afetadas por reações expansivas (19 barragens, 36% do total de grandes barragens de betão observadas)



Barragens portuguesas afetadas por reações expansivas

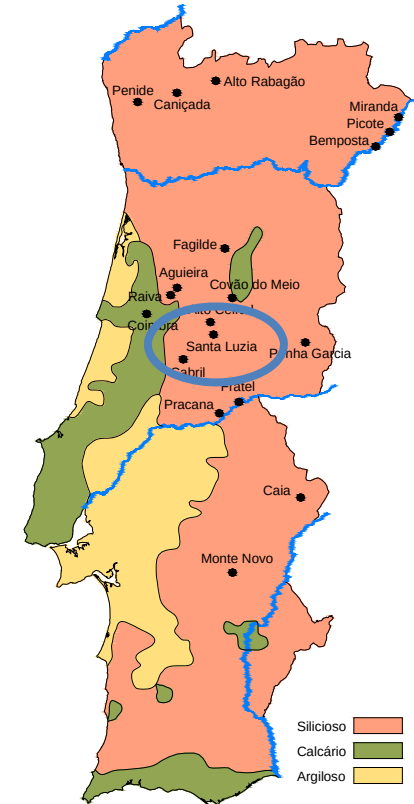
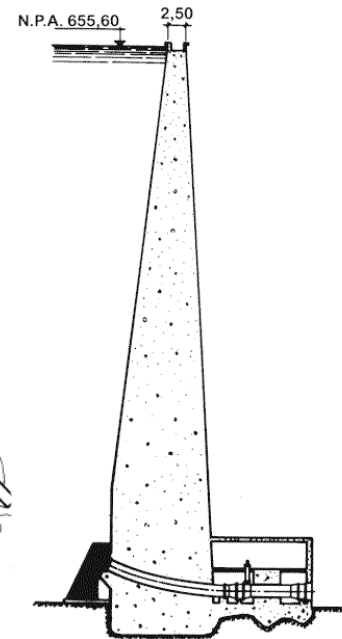
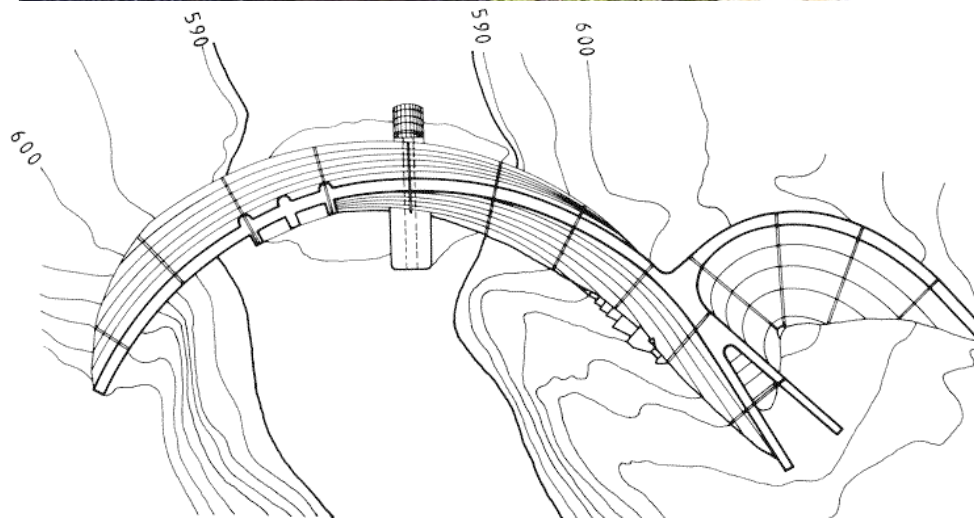
BARRAGEM	TIPO ESTRUTURAL	ANO DE CONCLUSÃO	ALTURA (m)	TIPO DE REAÇÃO	AGREGADOS		EXTENSÃO VERTICAL ACUMULADA ($\times 10^{-6}$)	VALOR MÉDIO DA TAXA DE EXPANSÃO NOS ÚLTIMOS 5 ANOS ($\times 10^{-6}$)
					GROSSOS	AREIA		
Santa Luzia	Abóbada	1942	76	RAS	Quartzito	Quartzito	2200 - 500	20 - 5
Alto Ceira	Abóbada	1949	36	RAS	Quartzito	Quartzito	4600 - 600	120 - 10
Penide	Descarregadora	1949	18	RAS (?)	Granito	?	?	~10
Pracana	Contrafortes	1951	60	RSI - RAS	Quartzito/granito	Quartzito	1800 - 900	10 - 5
Covão do Meio	Abóbada	1953	28	RAS	Granito	?	?	30 - 10
Cabril	Abóbada	1954	132	RSI - RAS	Granito	?	200 - 100	< 5
Caniçada	Abóbada	1955	76	RAS	Granito	?	200 - 100	< 5
Picote	Abóbada	1958	100	RAS	Granito	Granito	~50	< 5
Miranda	Contrafortes	1961	80	RAS	Granito	Granito	200 - 100	< 10
Alto Rabagão	Abóbada	1964	94	RAS	Granito	Granito	~100	10 - 5
Bemposta	Arco gravidade	1964	87	RAS	Granito	?	~200	< 5
Caia	Contrafortes	1967	52	RSI - RAS	Granito	Quartzito	50 - 20	< 5
Fratel	Descarregadora	1973	43	RSI - RAS	Granito	Sílica	200 - 100	15 - 5
Penha Garcia	Gravidade	1980	25	RAS (?)	Quartzito	Sílica	~50	< 5
Coimbra	Descarregadora	1981	40	RAS (?)	?	Sílica	?	?
Raiva	Gravidade	1981	36	RAS (?)	Granito	Sílica	?	?
Aguieira	Abóbadas múltiplas	1981	89	RAS	Granito	Sílica	~50	< 5
Monte Novo	Gravidade	1982	30	RAS	Granito	?	~100	~10
Fagilde	Gravidade	1984	27	RSI	Calcário	Sílica	2200 - 700	120 - 30



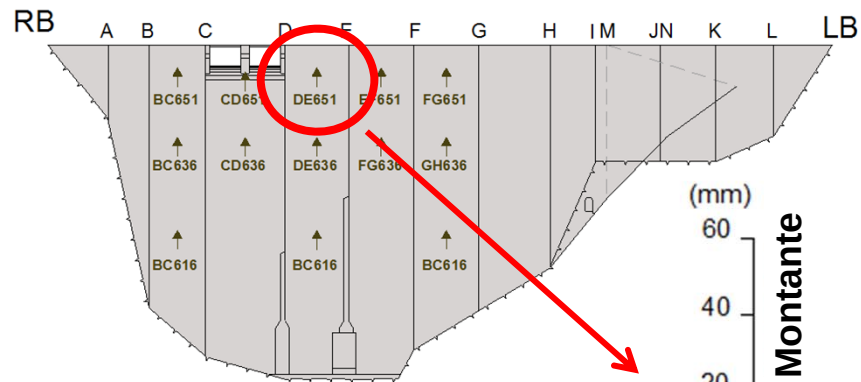
Barragem de Santa Luzia



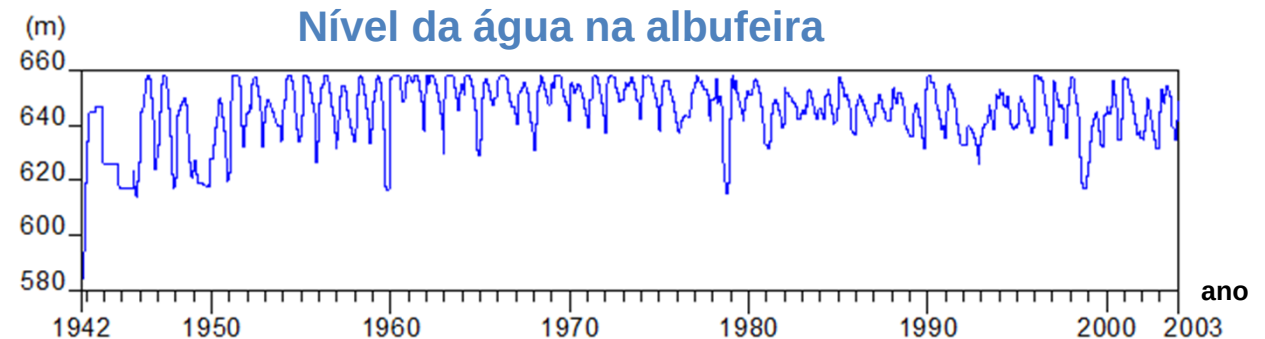
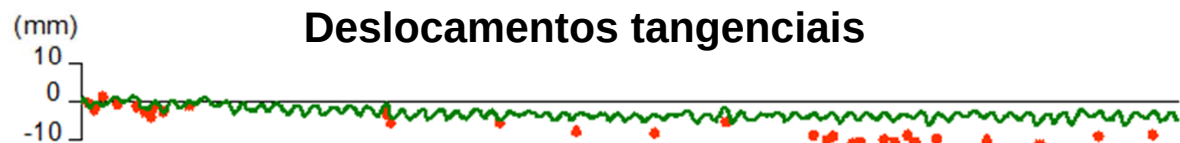
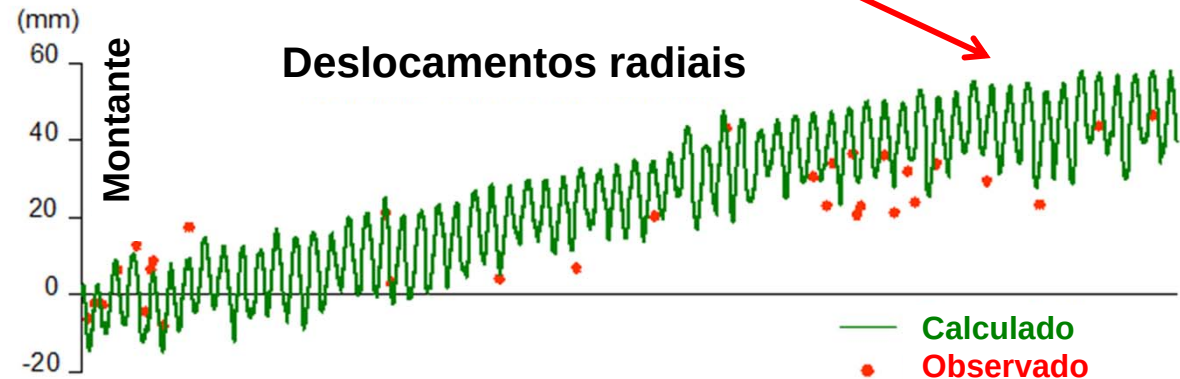
- ❖ Primeira barragem abóbada construída em Portugal (1942), com 76 m de altura, projetada por André Coyne
- ❖ Primeira barragem estudada no LNEC através de modelos físicos estruturais



Barragem de Santa Luzia

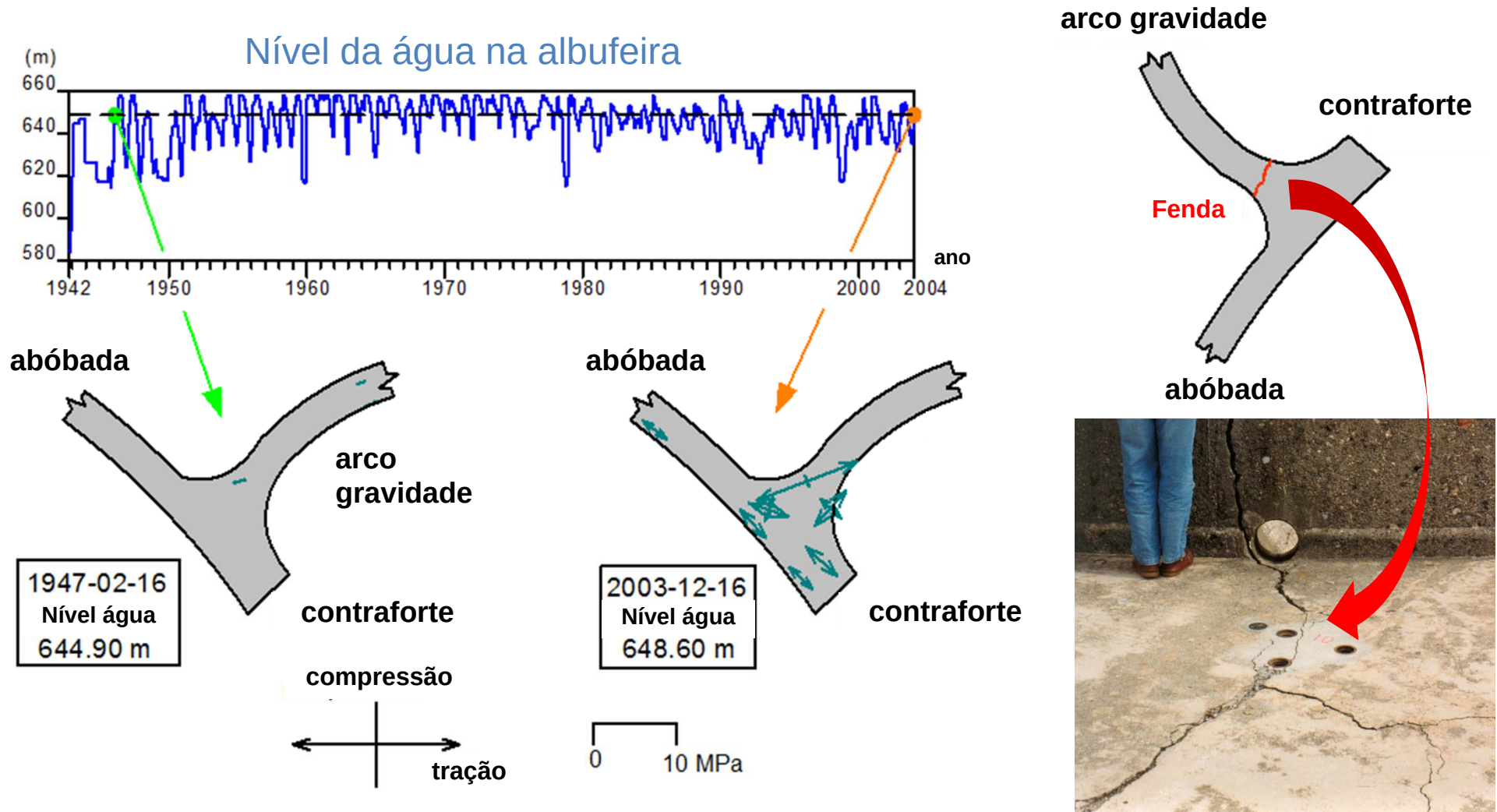


Pequena taxa de evolução dos deslocamentos, a reação tem vindo a esgotar-se



Barragem de Santa Luzia

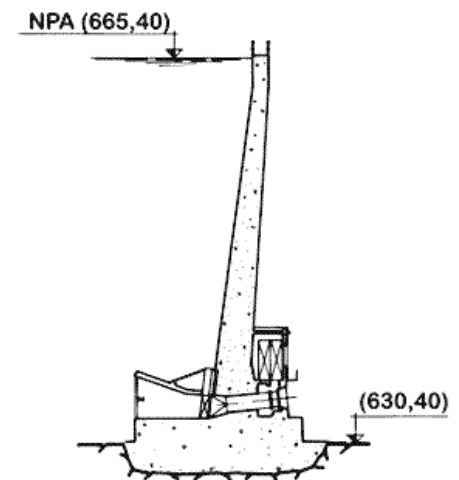
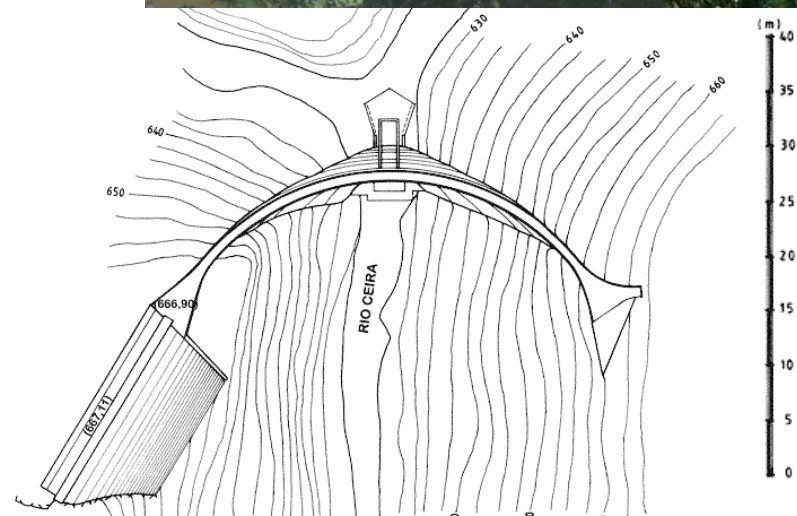
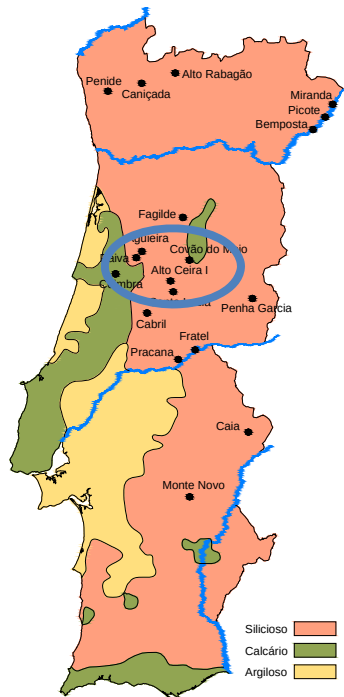
TENSÕES PRINCIPAIS NA ZONA DE LIGAÇÃO DA ABÓBADA PRINCIPAL COM O ARCO GRAVIDADE



Barragem do Alto Ceira I

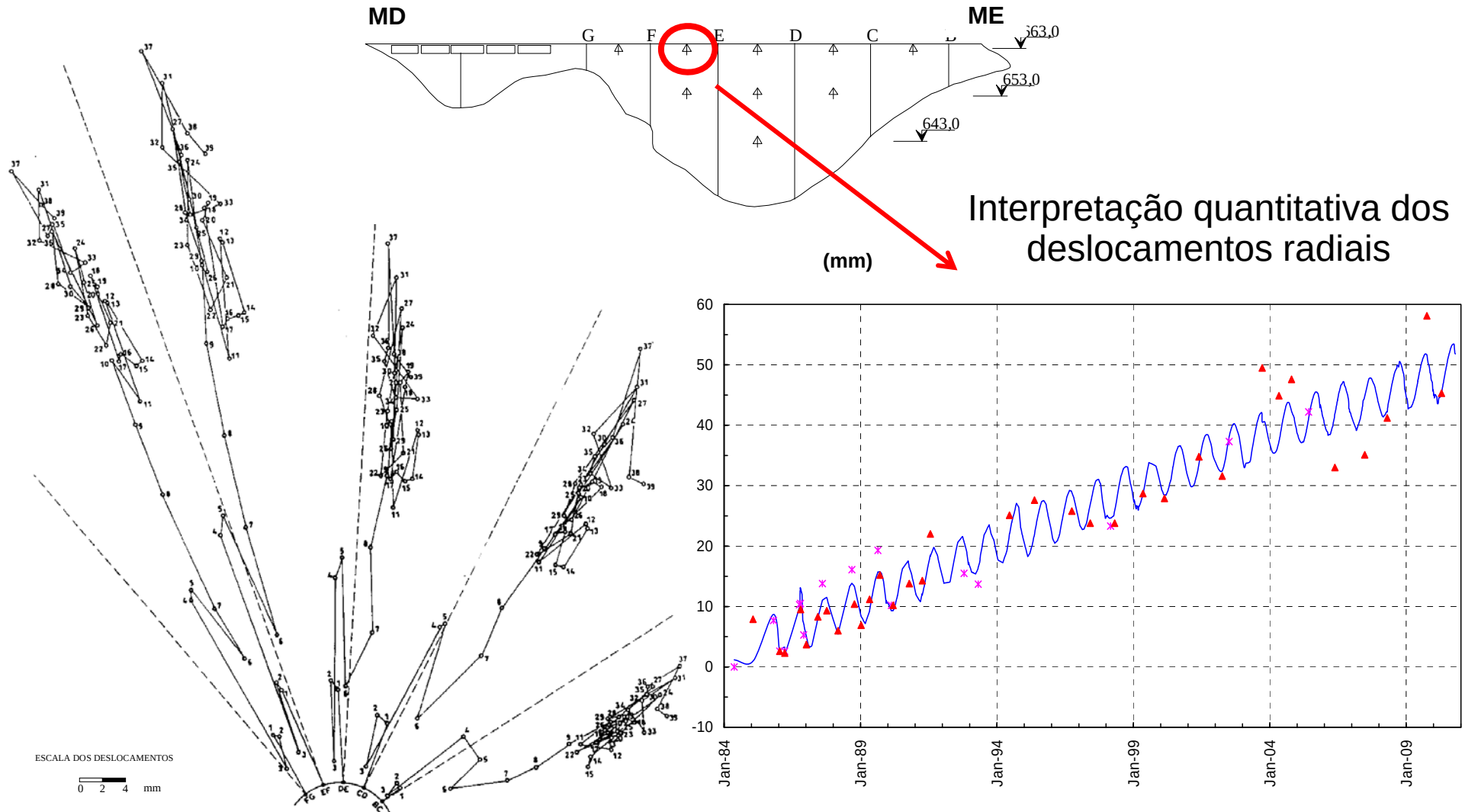
Abóbada delgada construída em 1949, com 34 m de altura e 85 m de comprimento do coroamento

- Fendilhação progressiva do corpo da barragem
- Deslocamentos progressivos, radiais para montante e verticais para cima



Barragem do Alto Ceira I

Deslocamentos horizontais (geodesia)

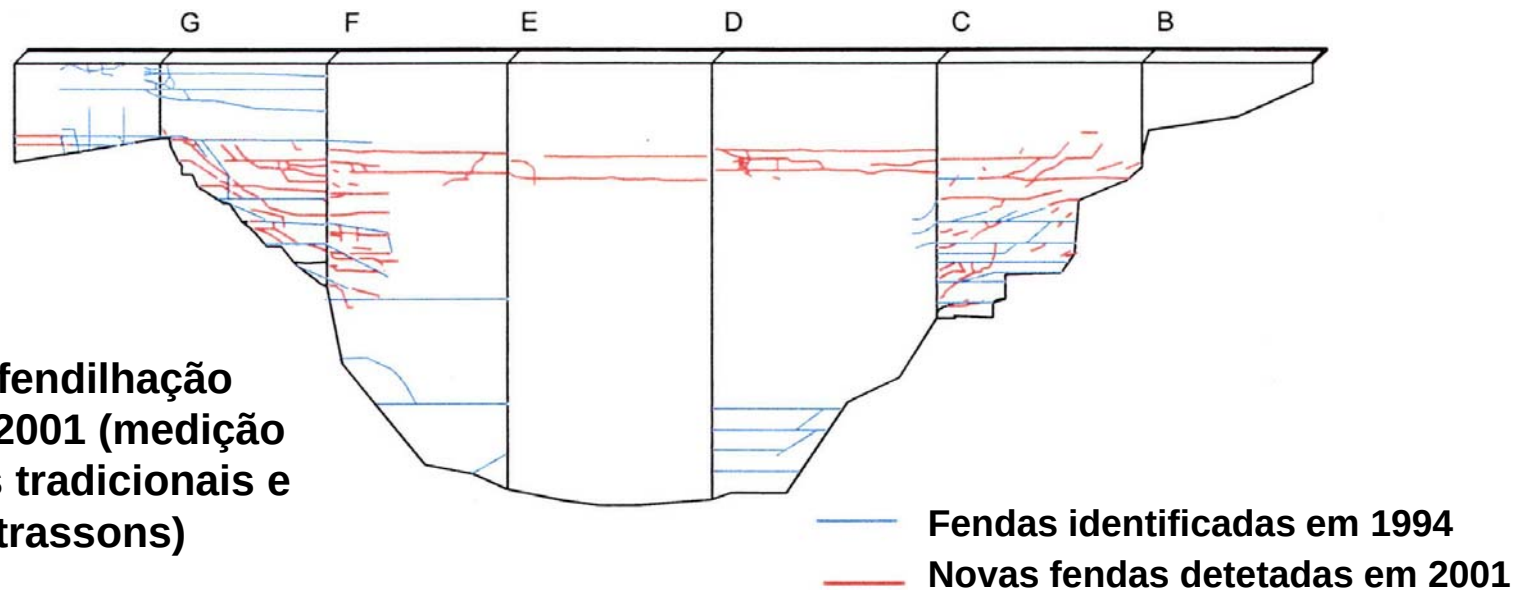


Barragem do Alto Ceira I

Fendilhação generalizada dos paramentos



Dispositivos para medição dos repasses pelas fendas na zona dos rins



Barragens do Alto Ceira I e II

**Primeiro enchimento da albufeira da nova barragem:
o trecho central da barragem antiga foi demolido**

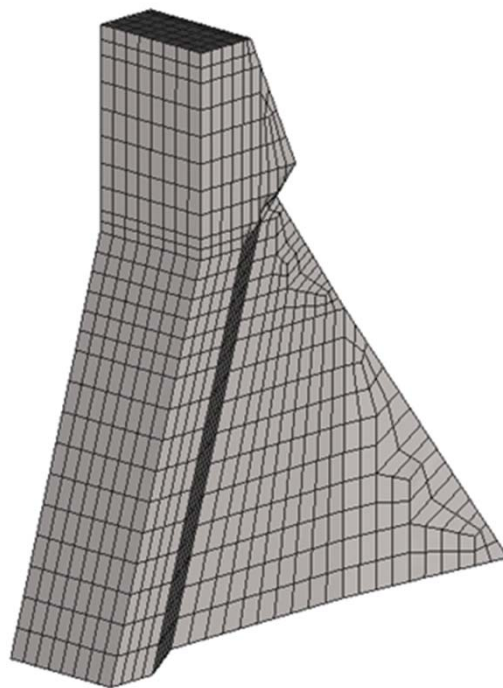
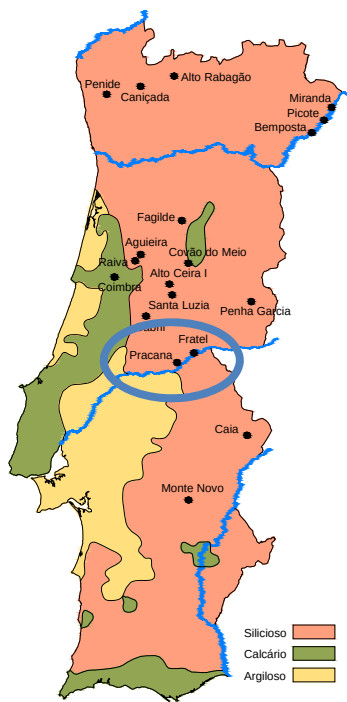


Vista das barragens em julho de 2014, no final do primeiro enchimento da nova albufeira

Barragem de Pracana

Principais características:

- 60 m de altura
- coroamento com 245 m
- 12 contrafortes (cabeça diamante)
- espessura mínima dos contrafortes: 4 m



Antes dos trabalhos de reabilitação



Depois dos trabalhos de reabilitação

Barragem de Pracana

Fendilhação generalizada do paramento de montante e das almas dos contrafortes



**Passagens
significativas de água
através de fendas
horizontais em juntas
de betonagem, com
espessos depósitos
de carbonato de
cálcio**

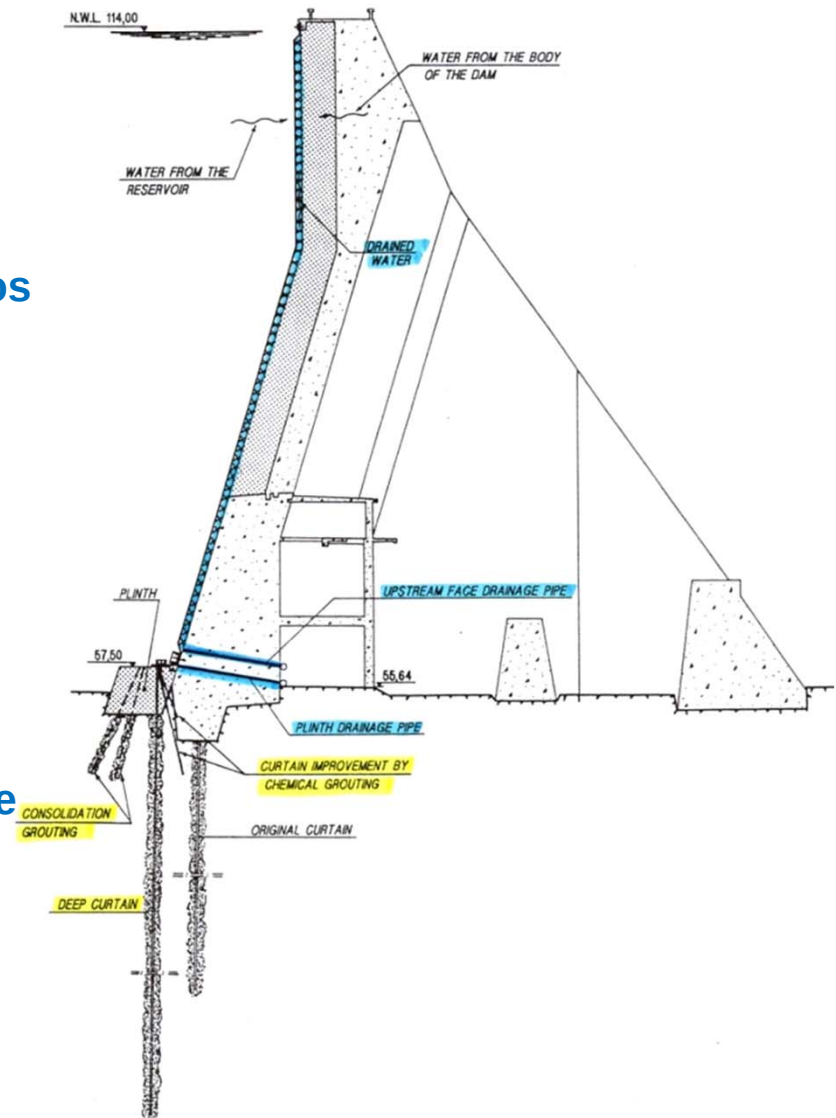
Deslocamentos

A análise quantitativa dos deslocamentos observados por métodos geodésicos mostrou parcelas não reversíveis com as seguintes taxas:

- **deslocamentos horizontais (jusante): 1,2 mm / ano**
- **deslocamentos verticais (cima) : 1,0 mm / ano**

Barragem de Pracana

- Obras de reabilitação da barragem
 - Elementos de travamento entre as almas dos contrafortes, na base, a jusante
 - Plinto de fundação a montante
 - Tratamento da fundação
 - Regeneração do betão (injeções)
 - Impermeabilização do paramento de montante
 - Melhoramento do sistema de observação
- Construção de um descarregador auxiliar na encosta da margem esquerda
- Reforço da potência instalada (nova tomada de água)



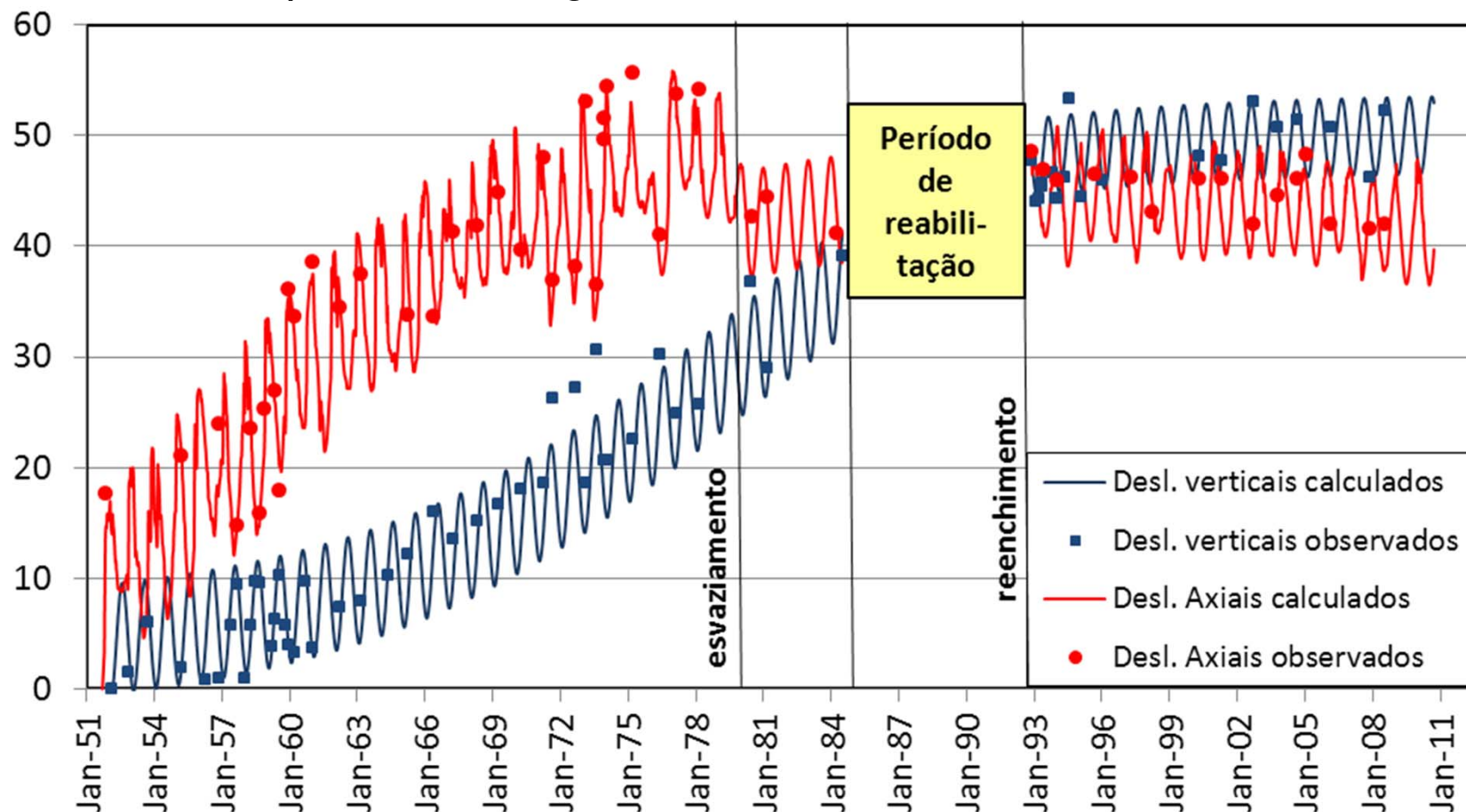
Barragem de Pracana

INSTALAÇÃO DA MEMBRANA DE IMPERMEABILIZAÇÃO NO PARAMENTO DE MONTANTE



Barragem de Pracana

Deslocamentos axiais e verticais no topo do contraforte central P6, medidos por métodos geodésicos, entre 1951 e 2011



A albufeira esteve vazia durante 14 anos (1978-1992)

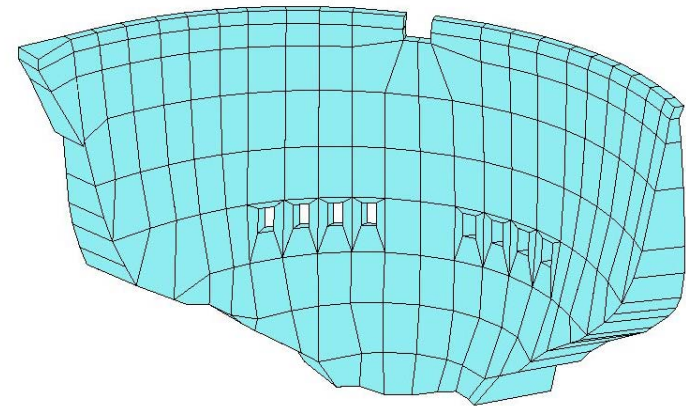
Barragem de Cahora Bassa



- Altura máxima: 170 m
- Espessura na base: 23 m
- Espessura no coroamento: 4 m
- Maciço de fundação: gnaisses
- Construção entre 1972 e 1975
- Albufeira com 66000 hm³

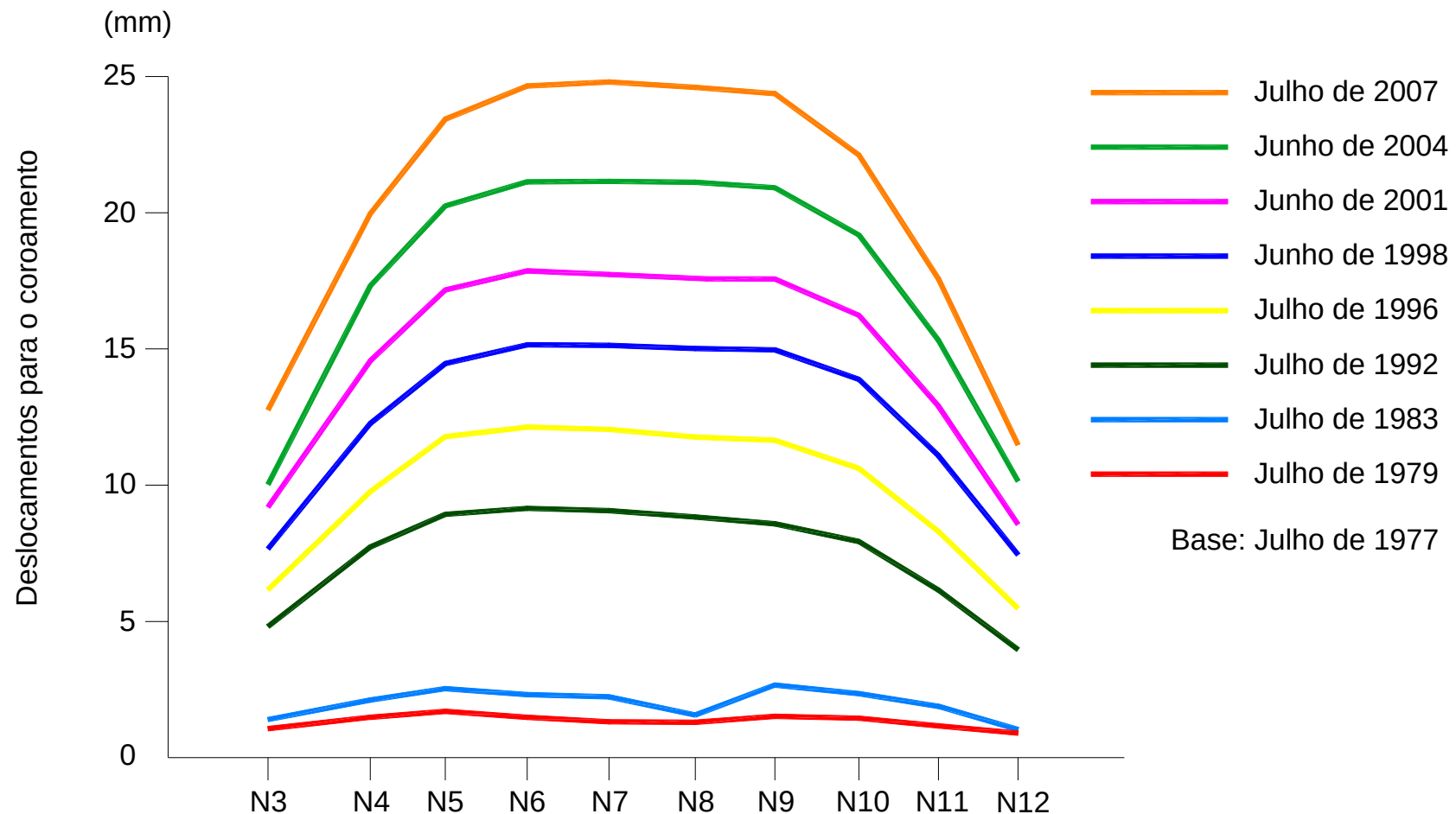
Expansões totais acumuladas: $\sim 500 \times 10^{-6}$

Taxa de expansão atual: $\sim 15 \times 10^{-6}$ /ano

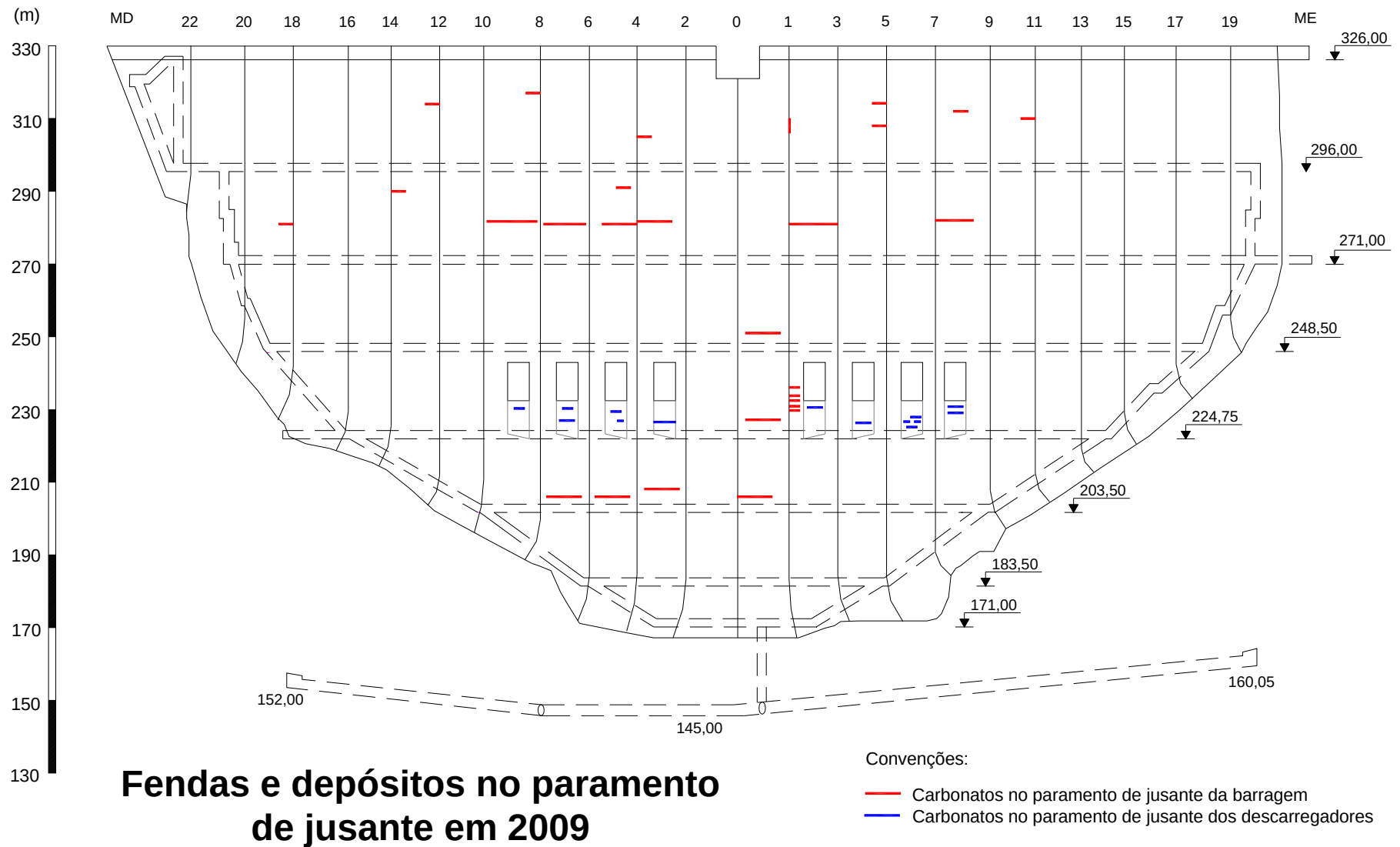


Barragem de Cahora Bassa

Deslocamentos verticais na galeria próxima do coroamento, obtidos em nivelamentos de precisão, entre 1997 e 2007



Barragem de Cahora Bassa



Barragem da Matala



Principais características:

- descarregadora com 16 m de altura
- coroamento com 1035 m
- 29 vãos de 17,5 m com comportas automáticas
- pilares de 2,5 m de espessura
- 2 viadutos (rodoviário e ferroviário)
- entrada em serviço em 1959

Obra não tinha sistema de observação

Principais patologias:

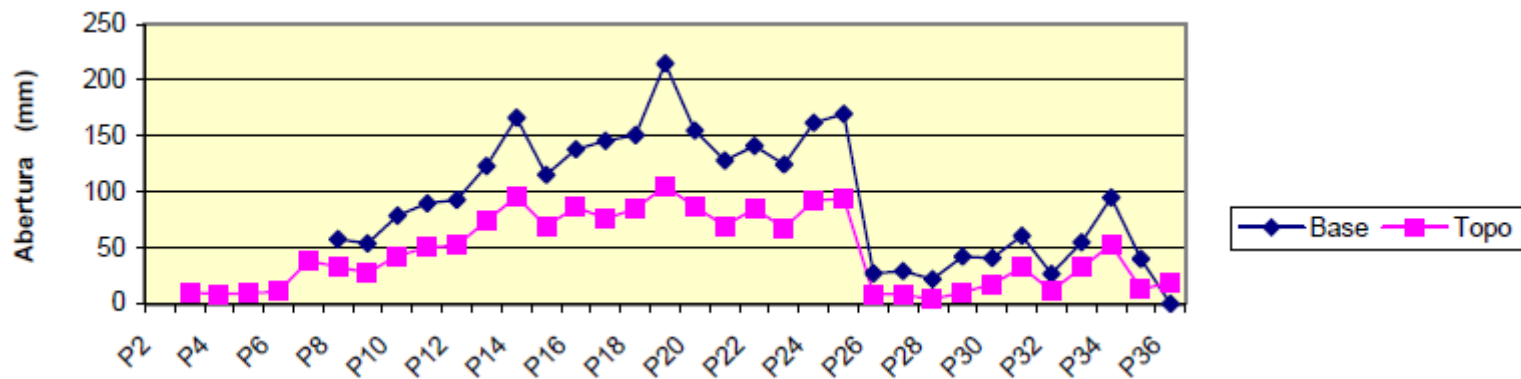
- Fendilhação generalizada dos betões
- Abertura das juntas dos pilares
- Grande depreciação da resistência dos betões



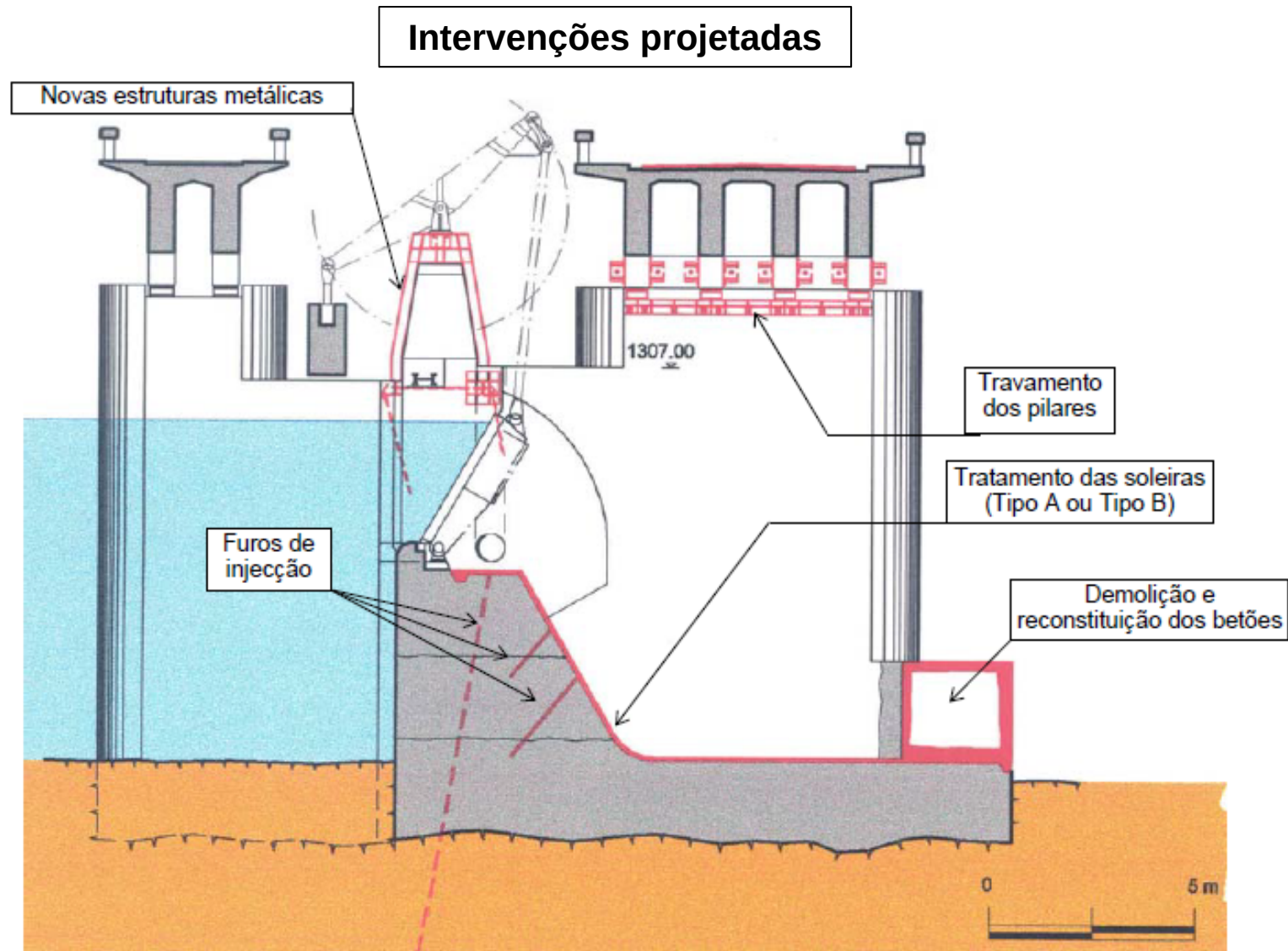
Barragem da Matala



**Aberturas
das juntas
dos
pilares,
medidas
em 2002**



Barragem da Matala



Barragem de Kariba



Principais características:

- Abóbada com 128 m de altura
- coroamento com 617 m
- espessura no topo de 13 m
- construção entre 1957 e 1959
- albufeira com 181000 hm³

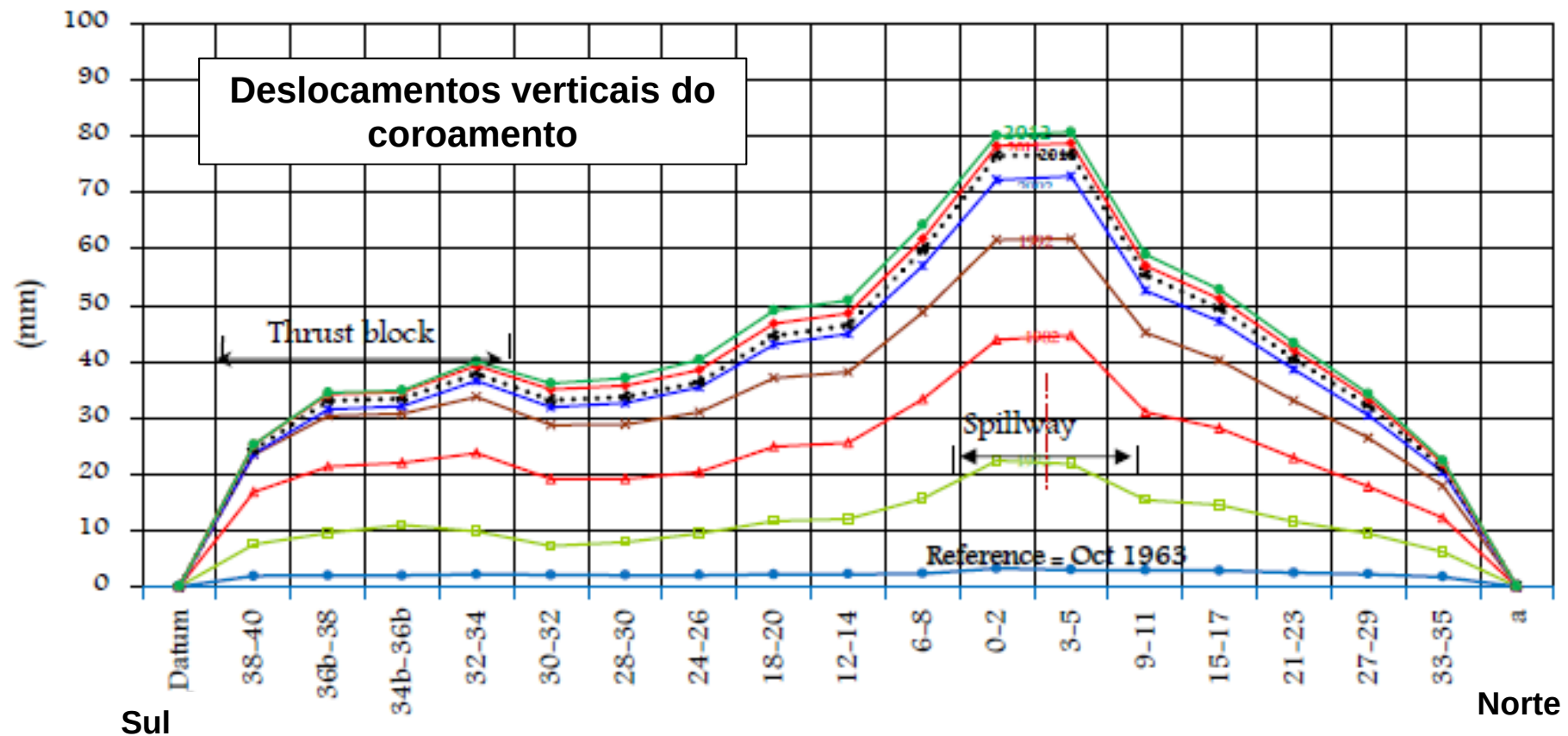
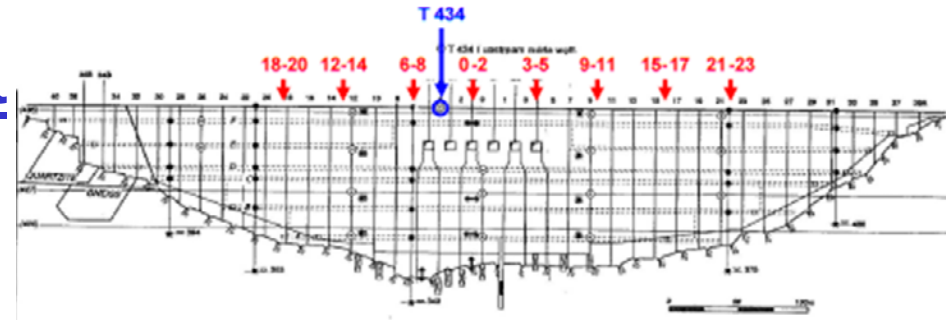
Expansões totais acumuladas: $> 500 \times 10^{-6}$

Taxa de expansão nos últimos anos: 10×10^{-6} /ano

Fendilhação muito expressiva na zona dos descarregadores

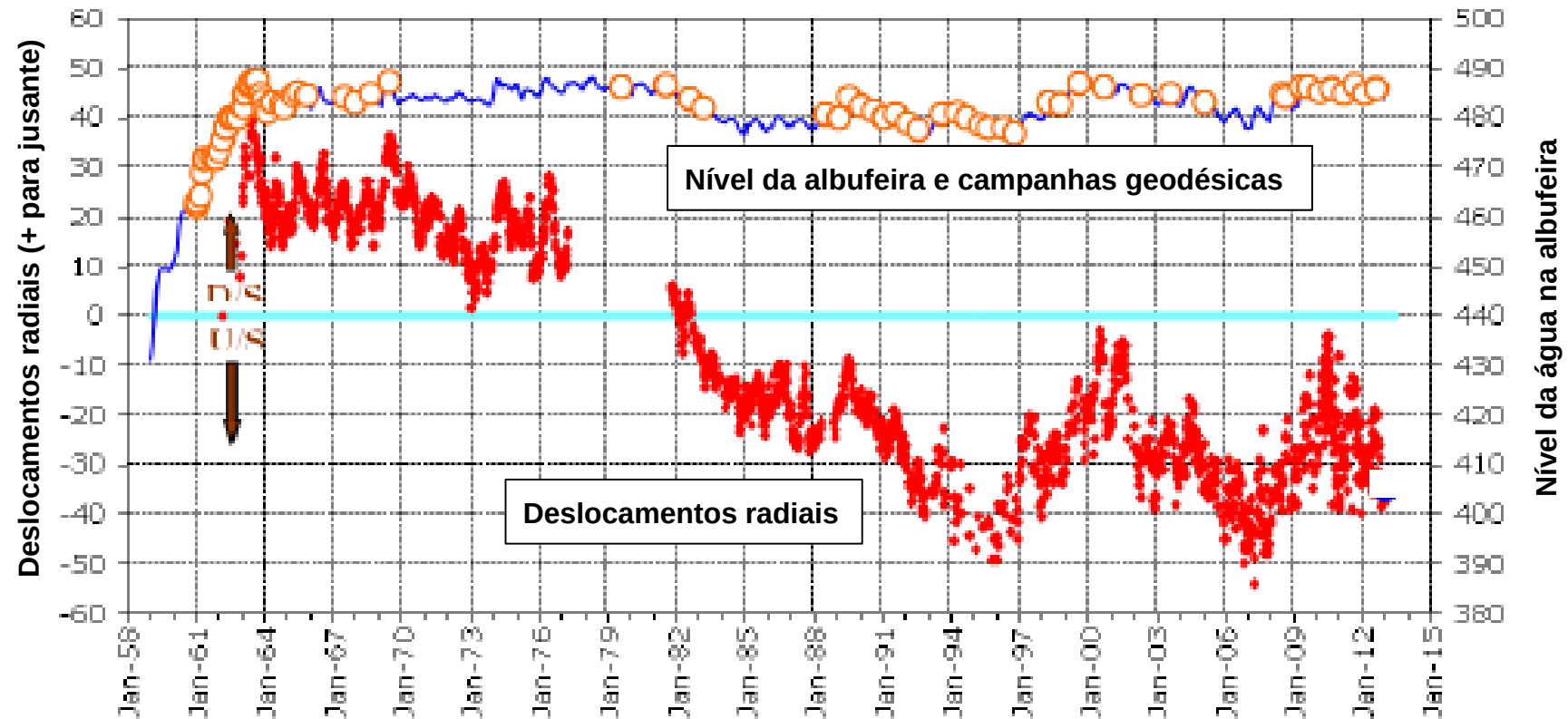
Devido à sua importância, a barragem de Kariba serviu de caso de estudo no tema A, *Effect of concrete swelling on the equilibrium and displacements of an arch dam*, do XI ICOLD Benchmark Workshop on Numerical Analysis of Dams, realizado em Valência (Espanha) em 20 e 21 de outubro de 2011

Barragem de Kariba



Barragem de Kariba

Deslocamentos radiais do alvo T434



As taxas anuais de expansão parecem estar a diminuir, a reação pode estar a esgotar-se

Barragem de Pian Telessio (Itália)

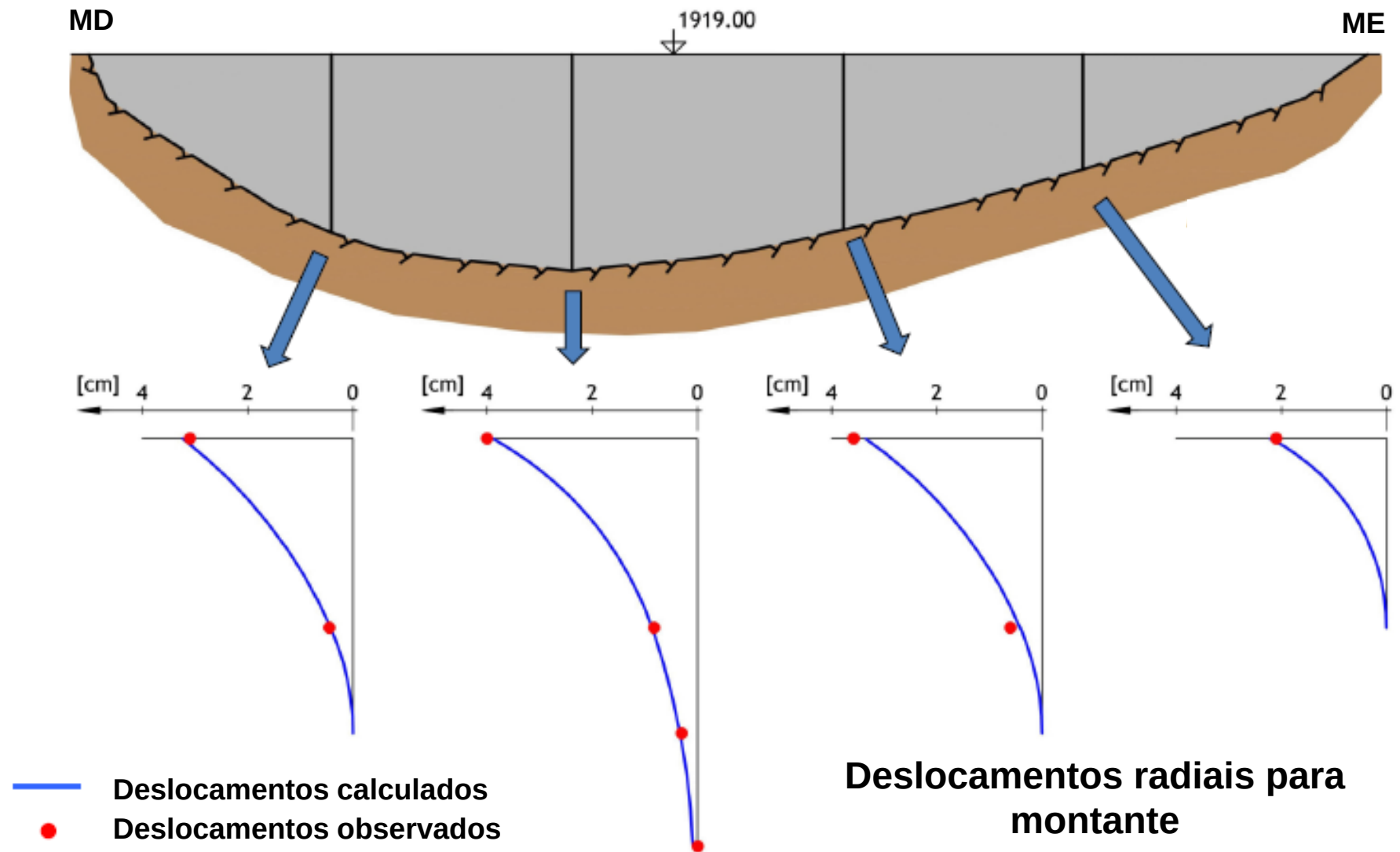


Principais características:

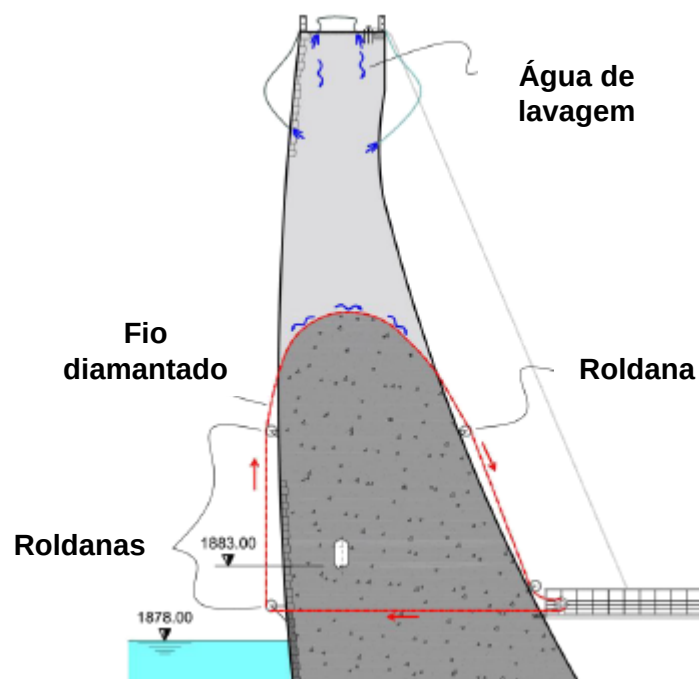
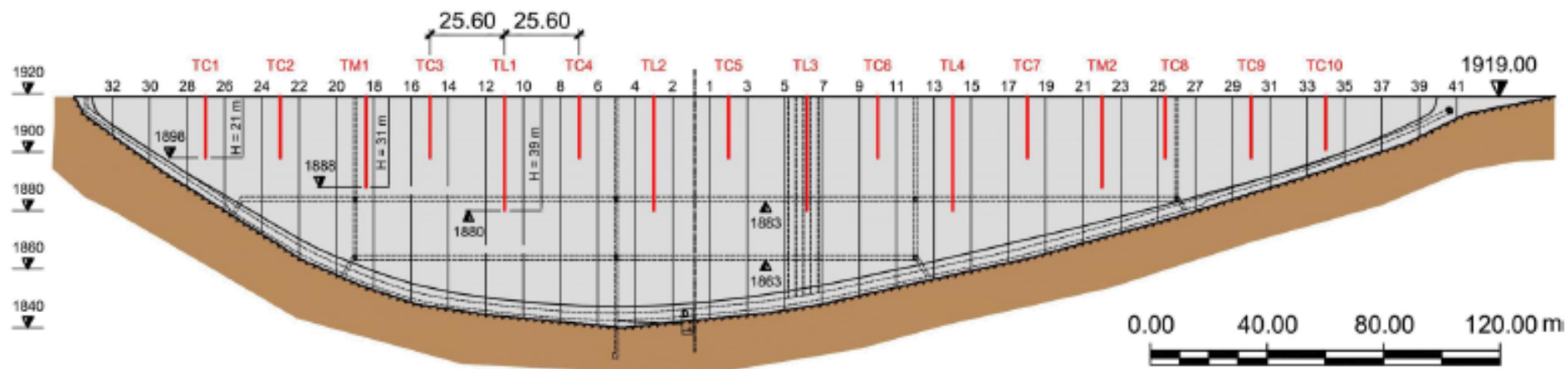
- arco gravidade
- altura de 80 m
- coroamento com 515 m
- espessura no topo de 5,7 m
- espessura na base de 34,6 m
- construção entre 1950 e 1955
- maciço de fundação: gnaisses

- O processo expansivo iniciou-se cerca de 25 anos após a construção
- Taxa de expansão nos últimos anos: 10×10^{-6} /ano (valor moderado)
- Valores acumulados das expansões superiores a 250×10^{-6}
- Intervenção precoce para evitar a fendilhação estrutural

Barragem de Pian Telessio (Itália)



Barragem de Pian Telessio (Itália)



Algumas barragens intervencionadas ou substituídas

Barragens com grandes reabilitações:

- Pracana, Portugal, 1978 a 1992 (que tem sido considerada, internacionalmente, como um grande êxito)
- Chambon, França (impermeabilização parcial , cortes e cintagens)
- San Esteban, Espanha (impermeabilização parcial)
- Mactaquac, Canadá (cortes parciais todos os anos, desde a década de 1990)
- Fontana, EUA (cortes nas décadas de 1970 e 2000)
- Salanfe, Suíça, 2012 (cortes nas juntas) e 2013 (cortes nos blocos)
- Pian Telessio, Itália (cortes em 2013)

Barragens substituídas:

- Drum Afterbay, EUA, 1966
- American Falls, EUA, 1978
- Maentwrog, Gales, 1992
- Abóbada do descarregador de emergência, barragem de Fontana, EUA, 2002
- Lady Evelyn, Canadá, 2009
- Serra, Suíça, 2010
- Alto Ceira, Portugal, 2013

Notas finais (1/2)

- ❖ Nas obras novas deve dar-se especial atenção à conceção das estruturas e à prevenção dos fenómenos:
 - Estruturas com formas e juntas adequadas, verificadas com coeficientes de segurança confortáveis para situações extremas de utilização
 - Especificações para materiais (E461 do LNEC, recomendações da RILEM)
 - Planos de observação que permitam a deteção de comportamentos anómalos, permitindo o planeamento atempado da realização de estudos e de intervenções

- ❖ As reabilitações das obras, quando necessárias, são, em geral, complexas e onerosas, pelo que deverão ser mobilizados os agentes melhor preparados

Notas finais (2/2)

- ❖ Portugal e França têm cerca de 1/3 das barragens de betão afetadas por reações expansivas; Suíça, Itália, Espanha, Brasil e Estados Unidos da América também têm um número significativo de barragens deterioradas; a situação mais grave é no Canadá, onde existe um grande número de barragens danificadas
- ❖ Na África Austral há casos reportados na África do Sul; as barragens de Kariba e Cahora Bassa, devido à sua enorme importância e perigosidade, requerem um acompanhamento especialmente cuidado da evolução desta patologia
- ❖ Moçambique deve prosseguir os esforços de capacitação técnica no domínio da segurança de barragens, por forma a também estar preparado para este tipo de problemas

Muito obrigado pela
vossa atenção!

