

Escolha de formas de barragens abóbada



**António Lopes
Batista¹**



**José Alberto
Meliço²**

RESUMO

Portugal é um dos países europeus com maior potencial hidroeléctrico por explorar. Atendendo à dependência energética do exterior, o governo lançou, em 2007, um programa visando o aproveitamento racional dos recursos hídricos disponíveis. Está-se, em 2010, na fase de projecto de um conjunto de barragens abóbada integradas nesses aproveitamentos. Existindo uma vasta experiência da engenharia portuguesa neste tipo de estruturas, de que são exemplo o projecto e a construção de obras notáveis desde a década de 50 do século passado, nomeadamente as barragens do Cabril, Cahora Bassa, Funcho, Alto Lindoso e Alqueva, estas duas últimas galardoadas com o prémio internacional Puente de Alcântara, mas sendo escassos os documentos técnicos orientadores da escolha da forma destas estruturas, julgou-se oportuno dar um contributo neste domínio, realizando um trabalho, no âmbito de uma dissertação de mestrado, de pesquisa e escolha de formas em função das características geométricas do vale a obstruir.

O trabalho iniciou-se com a pesquisa dos critérios utilizados na escolha da forma das barragens abóbada, utilizando arcos circulares, de um e três centros, e parabólicos, tendo permitido o estabelecimento de um algoritmo de definição de formas com arcos parabólicos, em função da geometria do vale e de um número reduzido de parâmetros de controlo. O algoritmo foi acoplado a programas de geração automática de malhas tridimensionais e de elementos finitos, possibilitando, através de um processo totalmente automatizado e rápido, a análise estrutural e a selecção das formas mais adequadas.

O método desenvolvido foi aplicado a casos de estudo com resultados animadores.

PALAVRAS-CHAVE

Barragens abóbada; Definição de formas; Arcos circulares e parabólicos; Método dos elementos finitos.

¹ Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. Brasil n.º 101, 1700-066 Lisboa, Portugal. a.l.batista@lnec

² Aluno Finalista do Mestrado em Engenharia Civil – Estruturas e Geotecnia, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal. eidt.inove@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A engenharia de barragens portuguesa tem uma vasta experiência em barragens abóbada, de que são exemplo o projecto e a construção de obras notáveis desde a década de 50 do século passado, nomeadamente as barragens do Cabril, Cahora Bassa, Funcho, Alto Lindoso e Alqueva, estas duas últimas galardoadas com o prémio internacional Puente de Alcântara. No entanto, são escassos os documentos técnicos orientadores da escolha da forma destas estruturas, pelo que se julgou oportuno dar um contributo neste domínio, realizando um trabalho, no âmbito de uma dissertação de mestrado, de pesquisa e selecção de formas em função das características geométricas do vale a obstruir.

O trabalho foi assim direccionado para o estudo dos métodos de definição de formas de barragens abóbada, visando, na medida do possível, a sua melhoria. Pretendeu-se, ainda, que essa melhoria fosse alcançada através do estabelecimento de algoritmos simples, tendo em consideração os resultados da pesquisa bibliográfica realizada e a experiência portuguesa nesse domínio.

Nesta comunicação referem-se os aspectos relevantes do trabalho realizado [1]. Abordam-se os critérios de projecto e a definição de formas das barragens abóbada e apresentam-se os principais resultados obtidos num caso de estudo.

2 CRITÉRIOS DE PROJECTO DAS BARRAGENS ABÓBADA

2.1 Considerações gerais

O projecto de estruturas, em geral, e das barragens de betão, em particular, deve contemplar requisitos de fiabilidade (funcionalidade, segurança e durabilidade), de economia e de estética.

As obras de betão devem ter uma definição analítica simples das suas formas e dimensões, utilizando equações que permitam uma percepção imediata da sua geometria. Assim facilita-se a sua representação gráfica e, acima de tudo, a implantação de cofragens durante a construção.

Quanto à fiabilidade estrutural, deve fazer-se um aproveitamento óptimo do material, isto é, devem procurar-se formas para as quais, em condições normais de exploração das obras, as tensões não ultrapassem os valores de cálculo dos limites de elasticidade, afectados de um coeficiente de segurança, e, simultaneamente, tenham a maior uniformidade possível.

2.2 Acções

As principais acções a considerar nas barragens de betão são as seguintes [2]:

- a) Na fase de construção: as gravíticas devidas à colocação dos materiais; as térmicas, higrométricas e autogéneas, associadas à colocação, presa e endurecimento do betão; as térmicas ambientais; as devidas à injeção de juntas de contracção, ao tratamento das fundações e eventual aplicação de pré-esforços;
- b) Nas fases de primeiro enchimento e de exploração normal: as da água, estáticas e dinâmicas, devidas à formação e exploração da albufeira; as térmicas, ambientais e associadas à exploração da albufeira; as devidas à ocorrência de sismos; as devidas aos depósitos sólidos na albufeira; as associadas à formação de gelo e sua fusão, na albufeira e na estrutura;
- c) De carácter excepcional: as correspondentes ao sismo máximo de projecto (SMP); as correspondentes às grandes cheias; as devidas a escorregamentos das encostas e grandes deslocamentos potenciais na fundação, nomeadamente os provocados por movimentos do vale e sismos.

Das acções listadas assumem particular importância o peso próprio dos materiais, as acções estáticas da água (pressão hidrostática sobre os paramentos imersos e subpressões na interface com a fundação), as variações térmicas (especialmente em climas continentais, nos quais se verificam grandes amplitudes térmicas anuais) e os sismos. Em regra, o pré-dimensionamento das barragens abóbada é feito, numa primeira fase dos estudos, para as acções do peso próprio e da pressão hidrostática, deixando-se uma reserva de resistência para permitir a verificação da segurança numa segunda fase, que contempla já as acções térmicas e sísmicas.

2.3 Critérios de definição dos arcos e da consola central

A melhor forma das barragens abóbada é conseguida, em geral, com uma estrutura com dupla curvatura e, quando possível, com simetria de inserção no maciço de fundação.

A curvatura horizontal estabelece-se tentando centrar a linha de pressões das secções horizontais (arcos) da abóbada, supostas como independentes. Os estudos levados a efeito com modelos de membranas, tanto experimentais como numéricos, conduziram a formas em que a curvatura diminui do fecho para a nascedoura dos arcos [3,4]. Esta diminuição pode ser conseguida, analiticamente, definindo os arcos por meio de três centros, elipses, parábolas ou outras equações que garantam aquele objectivo. Com arcos de três centros há uma variação brusca de curvatura no ponto de tangência entre a zona central e as laterais, mas utilizando outro tipo de equações, como é o caso das parábolas, garante-se uma diminuição contínua e progressiva da curvatura.

A curvatura vertical tem como finalidade descentrar a linha de pressões para a acção do peso próprio, de modo a conseguir-se um estado generalizado de compressões verticais quando se combina aquela acção com a da pressão hidrostática. Este objectivo é conseguido, em regra, com uma curvatura com intradorso voltado para jusante. A espessura aumenta do coroamento para a base, acontecendo o inverso com a curvatura.

A definição da abóbada completa-se, em planta, com uma inserção na fundação contínua e regular, aumentando a espessura dos arcos para as nascedouras e salvaguardando que as consolas tenham uma curvatura que permita uma construção fácil por blocos. Esta última condição reveste-se de uma grande importância já que estudos de optimização de formas conduziram a consolas muito inclinadas para jusante [3,4] que não são estáveis, por si só, durante a construção.

2.4 Pré-dimensionamento dos arcos

O pré-dimensionamento dos arcos é feito, em regra, considerando-os circulares e de espessura constante. A partir de uma teoria muito simples, a fórmula dos tubos, e considerando algumas hipóteses simplificativas, é possível estimar o ângulo ao centro que optimiza o volume de betão da barragem, para um nível de tensões de compressão previamente definido [5]. Na Figura 1 representa-se a secção de um arco, definido pelo raio médio R , pela espessura e pelo ângulo ao centro ϕ .

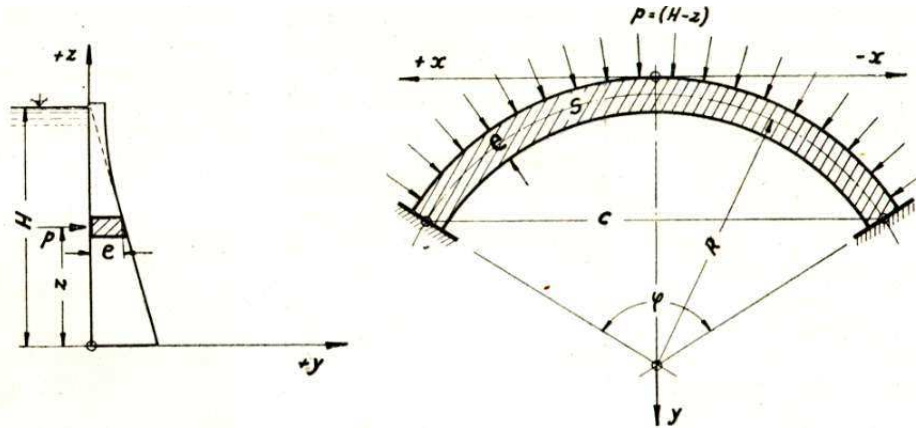


Figura 1 – Arco circular submetido a pressão radial uniforme [5]

A relação geométrica entre o raio R, a corda C e o ângulo ao centro φ é dada por,

$$R = \frac{C}{2 \operatorname{sen} \frac{\varphi}{2}} \quad (1)$$

Considerando que a pressão hidrostática mobiliza exclusivamente o efeito de arco, isto é, desprezando a rigidez da estrutura nas outras direcções e que a distribuição das tensões é uniforme na espessura, as tensões de compressão serão dadas por,

$$\sigma = \frac{p R}{e} \quad (2)$$

A pressão hidrostática pode ser expressa, à cota z, por,

$$p = \gamma (H - z) \quad (3)$$

A superfície de um arco é dada por,

$$S = R e \varphi \quad (4)$$

Substituindo (1), (2) e (3) em (4), vem,

$$S = \frac{C^2 \gamma (H - z)}{2 \sigma} \frac{\frac{\varphi}{2}}{\operatorname{sen}^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (5)$$

Pela condição de superfície mínima obtém-se,

$$\frac{\partial S}{\partial \varphi} = 0 \Rightarrow \varphi \approx 133^\circ \quad (6)$$

Obtêm-se, em regra, soluções económicas para amplitudes do ângulo ao centro compreendidas entre 80° e 130° , já que valores maiores que 130° não devem ser considerados pois a inserção dos arcos na fundação torna-se demasiado oblíqua, isto é, o impulso nas nascenças apresenta uma componente

tangencial elevada relativamente à orientação das encostas, que têm, em geral, uma direcção paralela ao eixo do vale.

Os arcos circulares de espessura constante das abóbadas podem ser definidos geometricamente pela equação do eixo e espessura ou pelas equações dos paramentos de montante e de jusante. Em regra utiliza-se esta segunda alternativa porque facilita a definição dos paramentos em caso de arcos circulares de espessura variável.

2.5 Equações dos arcos parabólicos

Apresenta-se, de seguida, o tipo de definição de formas, com arcos parabólicos do segundo grau, correntemente utilizada em Portugal, nomeadamente pela EDP. Considerando o referencial definido na Figura 2, a equação da directriz dos arcos é dada por,

$$y = \frac{x^2}{2p(z)} - a(z) \quad (7)$$

sendo $p(z)$ o parâmetro da parábola e $a(z)$ a distância, na horizontal, entre o fecho do arco e o cilindro de referência (cilindro vertical que contém a directriz do arco do coroamento). O parâmetro $p(z)$ representa o raio de curvatura dos arcos no fecho.

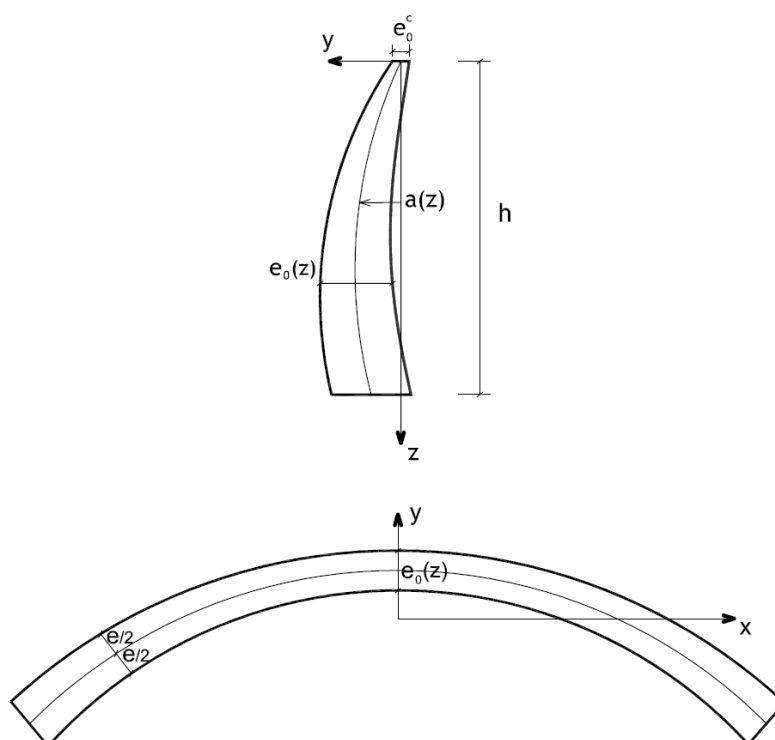


Figura 2 – Significado de algumas grandezas da definição de formas de uma barragem abóbada através de arcos parabólicos.

Para $p(z)$ considera-se um polinómio de grau N_p ,

$$p(z) = p_0 + \sum_{i=1}^{N_p} p_i z^i \quad (8)$$

sendo p_0 o raio de curvatura do arco do coroamento.

Para $a(z)$ adopta-se um polinómio de grau N_a ,

$$a(z) = \sum_{i=1}^{N_a} a_i z^i \quad (9)$$

A espessura da consola central $e_0(z)$ é também definida por uma função polinomial de grau N_e ,

$$e_0(z) = e_0^c + \sum_{i=1}^{N_e} e_i z^i \quad (10)$$

A variação da espessura dos arcos, em função de z e de x , é representada por uma função do tipo,

$$e(x, z) = e_0(z) \left[1 + A(z) \left(\frac{x}{100} \right)^2 \right] \quad (11)$$

A função $A(z)$, relativa à variação da espessura, é também polinomial de grau N_A ,

$$A(z) = A_0 + \sum_{i=1}^{N_A} A_i z^i \quad (12)$$

Os arcos de directriz parabólica apresentam, entre outras, as seguintes vantagens: i) a variação da curvatura é contínua; ii) tendo maior curvatura no fecho, concentram o efeito de arco na zona central, onde as espessuras são menores; e iii) melhora a ortogonalidade da inserção dos arcos nas encostas, com benefícios na transmissão dos impulsos nas nascenças.

3 MÉTODOS DE DEFINIÇÃO DE FORMAS

A obtenção de uma forma estrutural para uma barragem abóbada requer, em regra, diversas iterações durante a fase de projecto, até se conseguir a mais adequada. A forma inicial pode ser obtida considerando as relações empíricas propostas pelo USBR [6,7], que foram estabelecidas a partir das dimensões de um conjunto grande de barragens existentes. O método considera a barragem simétrica, definida com arcos circulares de espessura constante, sendo a consola central de espessura variável. Os parâmetros geométricos envolvidos, relacionados com a configuração do vale, são a altura total, h , a corda à cota do coroamento, L_1 , e a corda a uma cota de $0,15h$ acima da base, L_2 (Figura 3). Começa-se por obter o raio de curvatura do coroamento, a montante, $R_{cor, mont}$, a partir da corda L_1 a esse nível,

$$R_{cor, mont} = 0,6 L_1 \quad (13)$$

Atendendo à expressão (1), a relação (13) corresponde à consideração de um ângulo ao centro de 113 graus, o que está de acordo com os critérios antes definidos.

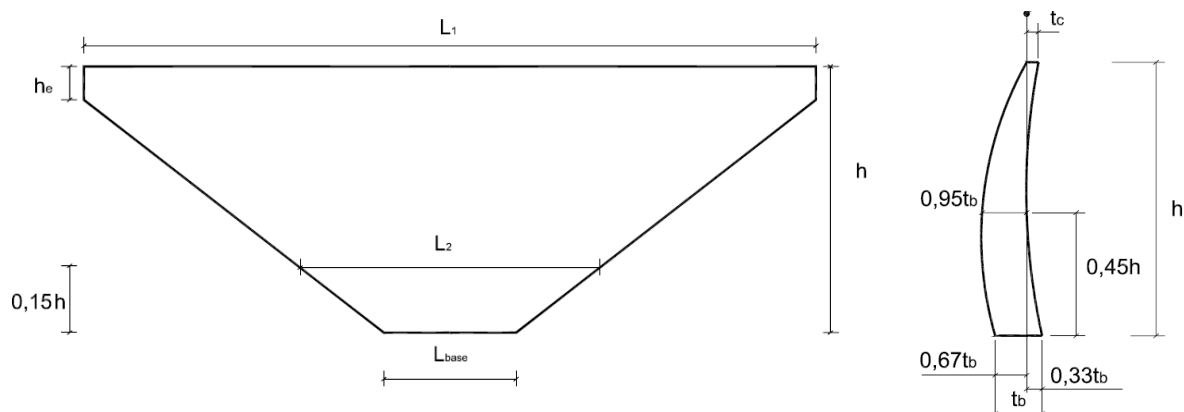


Figura 3 – Alçado esquemático da barragem e geometria da consola central na definição de formas com arcos circulares de espessura constante (método do USBR).

A definição da forma da consola central é apresentada na Figura 3 e no Quadro 1. A geometria desta consola condiciona as formas de toda a barragem e, conseqüentemente, a distribuição e magnitude das tensões.

Quadro 1 – Método do USBR. Definição geométrica da consola central

Espessura no coroamento	$t_c = 0,1 (h + 1,2 L_1)$
Espessura na base	$t_b = \sqrt[3]{0,0012 h L_1 L_2 \left(\frac{h}{400}\right)^{\frac{h}{400}}}$
Espessura a 0,45h	$t_{0,45h} = 0,95 t_b$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de montante, no coroamento	0
Distância entre a superfície de referência e o paramento de montante, na base	$0,67 t_b$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de montante, a 0,45h	$0,95 t_b$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de jusante, no coroamento	t_c
Distância entre a superfície de referência e o paramento de jusante, na base	$0,33 t_b$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de jusante, a 0,45h	0

As tensões calculadas com as formas obtidas pelo método do USBR mostraram que as estruturas obtidas são excessivamente esbeltas, considerando que não são admitidas tensões de tracção superiores a 1,0 MPa, em qualquer dos paramentos, para as acções com carácter de permanência. Assim, sugerem-se algumas adaptações ao método do USBR, apresentadas, sucintamente, no Quadro 2.

Quadro 2 – Método do USBR adaptado. Definição geométrica da consola central.

Espessura no coroamento	$t_c = 0,115 (h + 1,2 L_1)$
Espessura na base	$t_b = 1,3 \times \sqrt[3]{0,0012 h L_1 L_2 \left(\frac{h}{400}\right)^{\frac{h}{400}}}$
Espessura a 0,33h	$t_{0,33h} = t_b$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de montante, no coroamento	$\frac{t_c}{2}$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de montante, na base	$t_b^{\text{montante}} = 0,80 t_b$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de montante, a 0,33h	$t_b + \frac{t_c}{2}$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de jusante, no coroamento	$\frac{t_c}{2}$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de jusante, na base	$t_b^{\text{jusante}} = 0,20 t_b$
Distância entre a superfície de referência e o paramento de jusante, a 0,33h	$\frac{t_c}{2}$

As formas obtidas com arcos circulares de espessura variável, com as quais se consegue um bom desempenho estrutural, podem ser melhoradas considerando arcos parabólicos. Após a realização de várias experiências, chegou-se à seguinte proposta para o raio no fecho do arco do coroamento, a espessura do arco do coroamento e a espessura da base da consola central,

$$R_0^C = 0,45 L_1 \quad (14)$$

$$e_0^C = 0,1 (h + 1,4 L_1) \quad (15)$$

$$e_0^B = 1,2 \times \sqrt[3]{0,0012 h L_1 L_2 \left(\frac{h}{400}\right)^{\frac{h}{400}}} \quad (16)$$

sendo h , L_1 e L_2 as grandezas referidas anteriormente.

A definição analítica da directriz dos arcos é feita pela função (7), sendo o parâmetro da parábola $p(z)$ dado pela função polinomial (8), do terceiro grau.

A directriz vertical da consola central é definida pela equação (9), considerando uma função polinomial do quarto grau. O ponto de tangente vertical pode ser obtido para valores de k da ordem de 0,6 (Figura 4). A curvatura deve variar pouco no quinto superior da consola central. A distância a^b deve ser da ordem de 30% da espessura da base. A distância entre a superfície de referência e a directriz deve ser da ordem de grandeza do valor médio das espessuras na base e do coroamento.

A função polinomial (10), que define analiticamente a espessura da consola central, é do terceiro grau. A espessura a um terço da base deve ser da ordem de grandeza da espessura da base e a espessura a um terço do coroamento deve ser da ordem de grandeza do valor médio das espessuras na base e no coroamento.

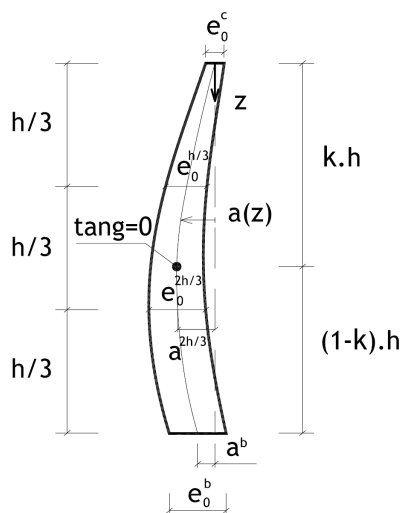


Figura 4 – Definição de formas com arcos parabólicos. Representação dos parâmetros $e_0(z)$ e $a(z)$ da consola central.

A variação da espessura dos arcos é dada pela expressão (11), sendo o factor de aumento da espessura para as nascenças traduzido pela função (12), que é um polinómio do terceiro grau. Em geral, um aumento da espessura para as nascenças da ordem dos 25%, na zona dos rins, proporciona um bom desempenho estrutural.

4 EXEMPLO DE APLICAÇÃO

4.1 Descrição do caso de estudo

O caso de estudo que se apresenta diz respeito a uma barragem com altura $h = 80$ m, implantada num vale largo com uma configuração em V, com uma corda no coroamento $L_1 = 220$ m, uma corda na base $L_{base} = 40$ m e $h_e = 10$ m, a que corresponde uma relação corda/altura de 2,75.

A aplicação dos três métodos de definição de formas descritos anteriormente conduziu a soluções com as características estruturais que se apresentam no Quadro 3. Na Figura 5 representam-se as consolas correspondentes às três soluções obtidas.

Quadro 3 – Características das soluções obtidas para $h = 80$ m, $L_1 = 220$ m, $L_{base} = 40$ m e $h_e = 10$ m

	Método do USBR (arcos circulares de espessura constante)	Método do USBR adaptado (arcos circulares de espessura variável)	Arcos parabólicos
Espessura da consola central no coroamento	3,4 m	4,0 m	4,0 m
Espessura da consola central na base	10,3 m	13,6 m	12,3 m
Espessura máxima nos rins	10,5 m	14,2 m	12,7 m
Volume de betão	95600 m ³	125800 m ³	121000 m ³

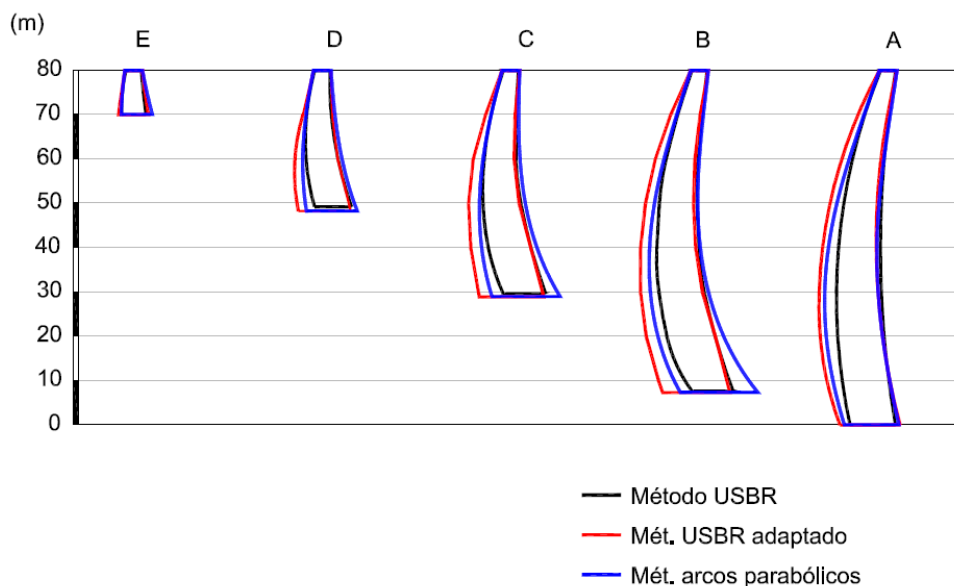


Figura 5 – Consolas da barragem para as três soluções estudadas.

4.2 Modelo estrutural, método de análise e acções

Foi considerado um modelo de casca espessa para a estrutura da abóbada, elasticamente apoiado na fundação, analisado, em regime elástico linear, pelo método dos elementos finitos. Foi utilizado um programa de cálculo automático desenvolvido no LNEC, que considera elementos finitos tridimensionais de casca espessa, do tipo cubo, com 16 pontos nodais (8 por face), a que correspondem funções de interpolação do segundo grau nas faces e lineares na espessura [2]. Para consideração da deformabilidade da fundação foi adoptada a técnica dos coeficientes de Vogt [8].

Para o betão da barragem e para o maciço rochoso de fundação admitiu-se um módulo de elasticidade de 20 GPa e um coeficiente de Poisson de 0,2.

Foram consideradas as acções do peso próprio e da pressão hidrostática. O peso próprio do betão foi representado por forças mássicas verticais ($\gamma_c=24 \text{ kN/m}^3$) e a acção da água, para o nível da albufeira à cota do coroamento, pela pressão hidrostática sobre o paramento de montante da barragem ($\gamma_w=10 \text{ kN/m}^3$).

4.3 Campos de tensões

Na Figura 6 representam-se as tensões principais nos paramentos da barragem definida com arcos circulares de espessura constante pelo método do USBR. O estado de tensão é predominantemente de compressão, excepto no trecho inferior do paramento de montante, em que se verificam tensões de tracção. As tensões de compressão têm valores máximos de cerca de 5 MPa no fecho dos arcos, a montante, e nos rins, a jusante, com direcção normal à inserção. As tensões de tracção são verticais, ocorrem na base dos blocos centrais e têm valores máximos de cerca de 2 MPa.

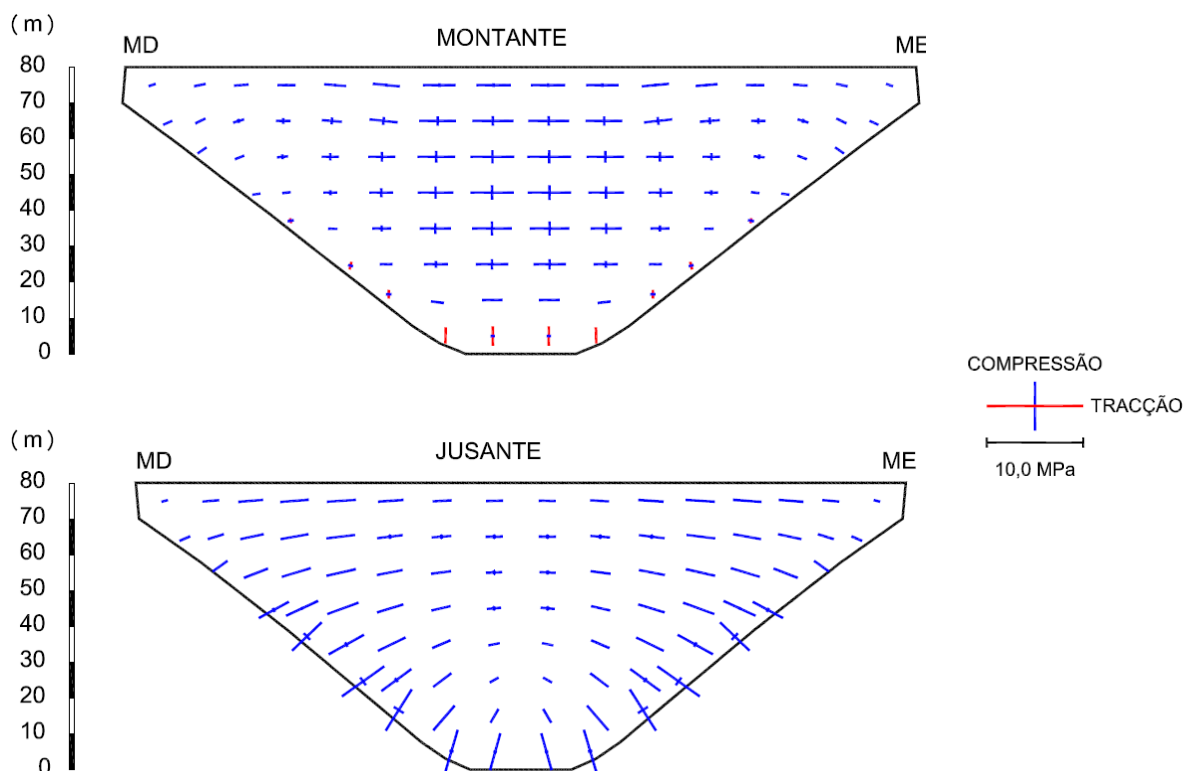


Figura 6 – Definição de formas com arcos circulares de espessura constante (método do USBR). Tensões principais nos paramentos da barragem, devidas ao peso próprio e à pressão hidrostática.

Na Figura 7 representam-se as tensões principais nos paramentos da barragem definida com arcos circulares de espessura variável (método do USBR adaptado). O estado de tensão continua a ser predominantemente de compressão, excepto ao longo da inserção da abóbada, no paramento de montante, em que se verificam tensões de tracção. As tensões de compressão têm valores máximos de cerca de 4 MPa no fecho dos arcos, a montante, e ao longo da inserção da abóbada, a jusante, normalmente à inserção. As tensões de tracção têm valores máximos de cerca de 0,9 MPa.

Na Figura 8 representam-se as tensões principais nos paramentos da barragem definida com arcos parabólicos. O estado de tensão é genericamente de compressão, havendo apenas tensões de tracção no trecho inferior do paramento de montante, com valores inferiores a 0,5 MPa. As tensões de compressão têm valores máximos de cerca de 3 MPa no fecho dos arcos, a montante, e nos rins, a jusante, normalmente à inserção.

Na Figura 9 representam-se as tensões horizontais no fecho dos arcos e tensões verticais na consola central, nos paramentos de montante e de jusante, para as três soluções estudadas, podendo notar-se a melhoria conseguida no caso da barragem definida com arcos parabólicos.

Escolha de formas de barragens abóbada

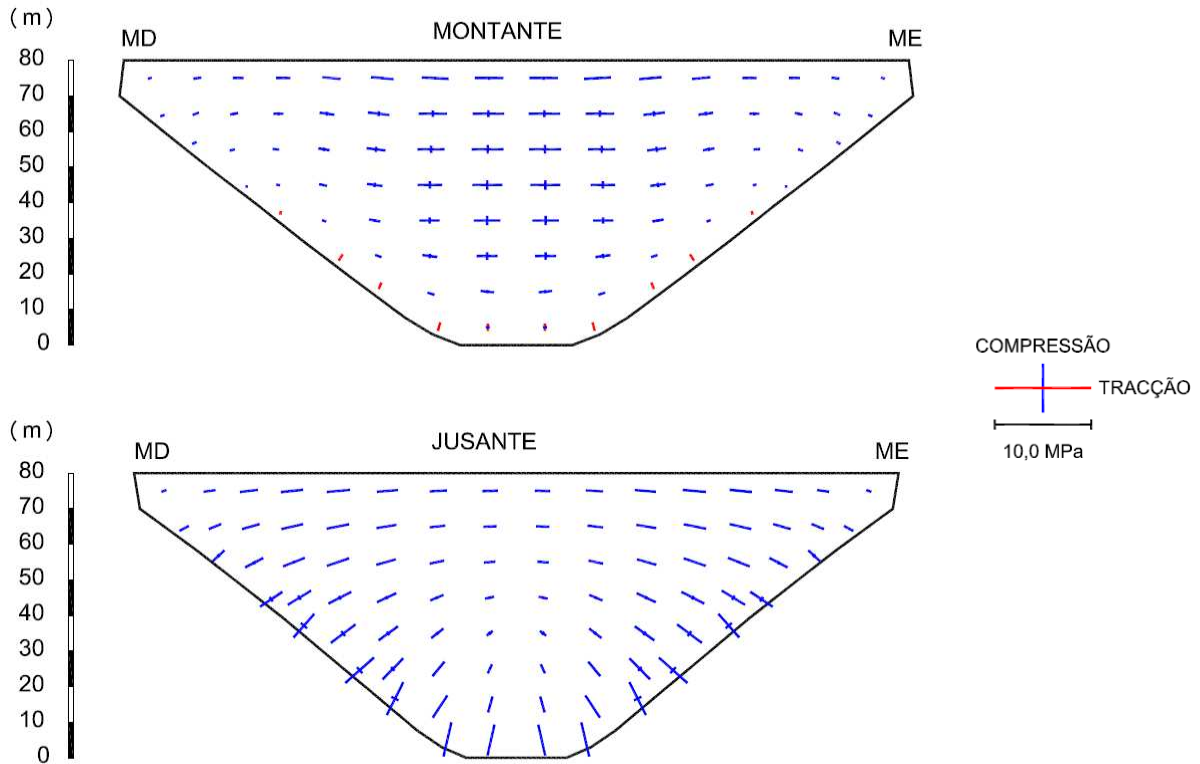


Figura 7 – Definição de formas com arcos circulares de espessura variável (método do USBR adaptado). Tensões principais nos paramentos da barragem, devidas ao peso próprio e à pressão hidrostática.

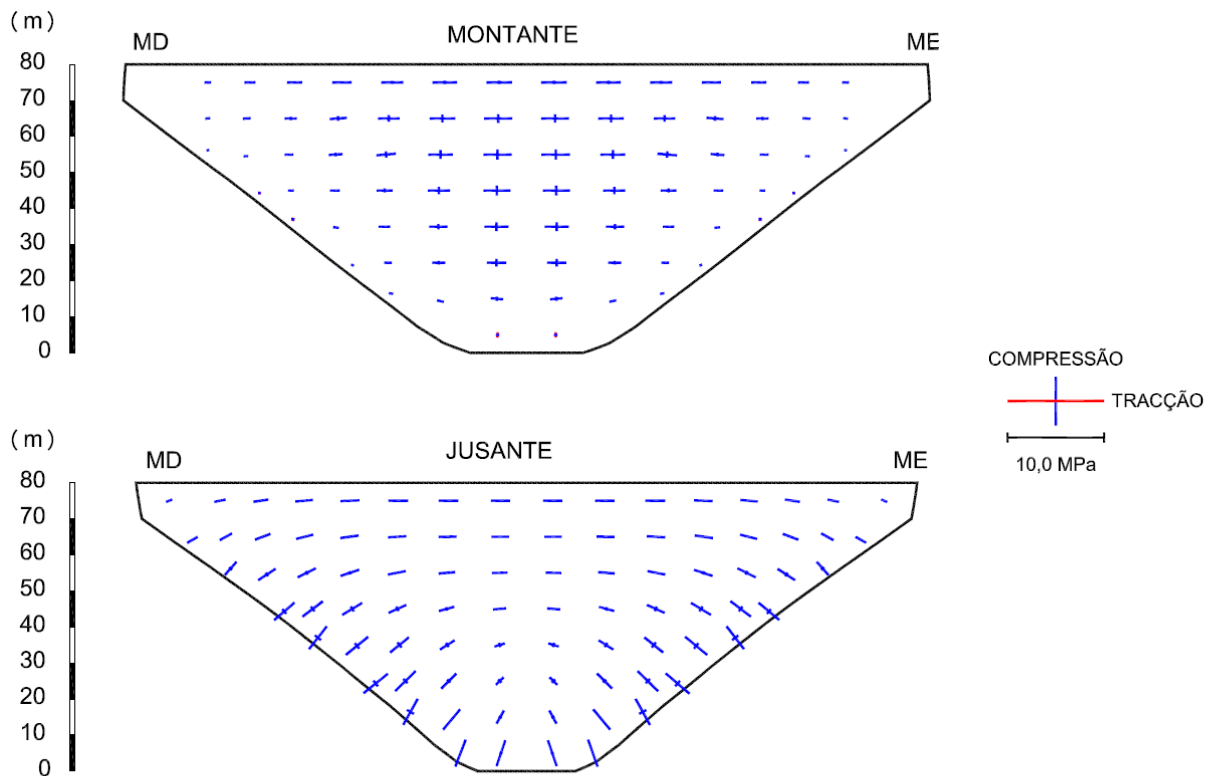


Figura 8 – Definição de formas com arcos parabólicos. Tensões principais nos paramentos da barragem, devidas ao peso próprio e à pressão hidrostática.

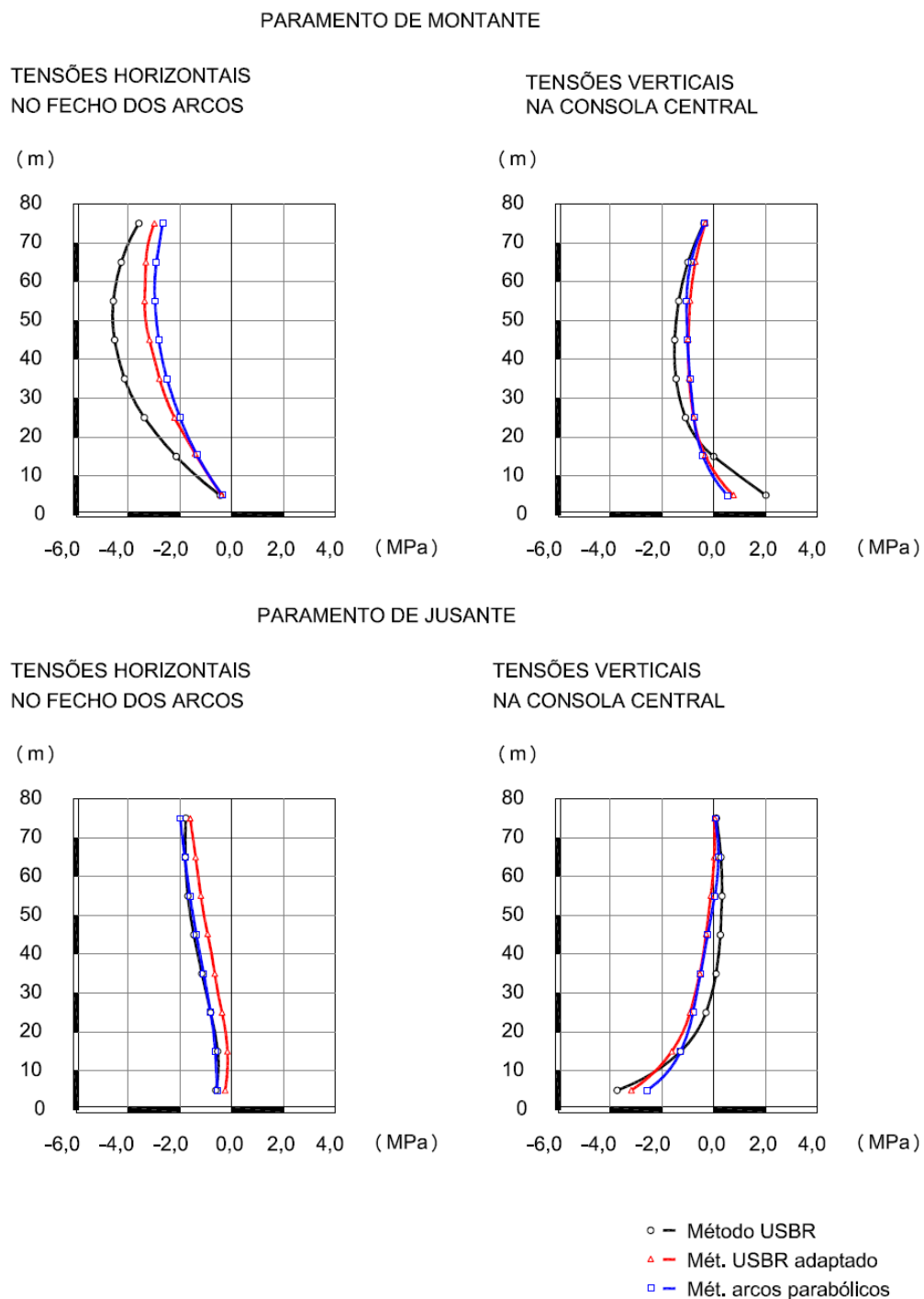


Figura 9 – Tensões horizontais no fecho dos arcos e tensões verticais na consola central, nos paramentos de montante e de jusante, para as três soluções estudadas.

5 CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu estabelecer um algoritmo de definição de formas das barragens abóbada com arcos parabólicos, em função da geometria do vale e de um número reduzido de parâmetros de controlo. Este algoritmo foi acoplado a programas de geração automática de malhas tridimensionais de elementos finitos, possibilitando, através de um processo totalmente automatizado e rápido, a análise estrutural e a selecção das formas mais adequadas.

A aplicação do algoritmo a casos de estudo teve resultados animadores. Pode considerar-se que as propostas apresentadas permitem a obtenção de formas interessantes como solução final. Esta definição de formas pode também ser considerada como um bom ponto de partida para um processo automático de optimização, com o qual se poderá ainda obter um refinamento adicional.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Eng^o João Salvador Fernandes, projectista da barragem de Cahora Bassa, e ao Eng^o José Paixão, do gabinete de projectos da EDP, os conselhos e as sugestões dados em diversas trocas de impressões.

REFERÊNCIAS

- [1] MELIÇO, J.A. – *Escolha de formas de barragens abóbada*. Dissertação de mestrado (Bolonha), Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Monte da Caparica, 2010.
- [2] BATISTA, A.L. – *Análise do comportamento ao longo do tempo de barragens abóbada*. Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1998.
- [3] SERAFIM, J.L. – *New shapes for arch dams*. Civil Engineering, ASCE, November 1966.
- [4] JÚLIO, E.N.B.S. – *Determinação numérica de formas para barragens abóbada pelo método da membrana*. Tese de mestrado (pré-Bolonha), Universidade de Coimbra, 1994.
- [5] FIALHO, J.F. – *Princípios orientadores do projecto de barragens abóbada. Um novo método de traçado e dimensionamento*. Memória n^o 65, LNEC, Lisboa, 1955.
- [6] USBR (United States Bureau of Reclamation) – *Guide for preliminary design of arch dams*. Engineering Monograph No. 36, Washington, 1977.
- [7] USACE (United States Army Corps of Engineers) – *Arch dam design*. Engineer Manual 1110-2-2201, Washington, 1994.
- [8] USBR (United States Bureau of Reclamation) – *Treatise on dams*. Denver, 1956.