

A CORTINA ESTANQUE DA BARRAGEM DE PARADELA

LUÍS HENRIQUE GOMES FERNANDES

Engenheiro Civil, Director Técnico

HIDROELÉCTRICA DO CÁVADO

1. A barragem de Paradela, do 4.º escalão do aproveitamento hidroeléctrico dos rios Cávado e Rabagão, actualmente em construção, é do tipo de enrocamento a granel, com 112 metros de altura acima do leito do rio.

As condições geológicas do único local possível para a sua construção conduziram à escolha deste tipo. Na verdade, o local, de granitos com variados graus de alteração, intensamente afectado por acidentes de natureza geológica, com grande profusão de falhas de orientação muito variável e apresentando com frequência espessas caixas de enchimento caulínico, obrigou desde logo a rejeitar as estruturas de betão, mesmo as menos rígidas, como as do tipo de contrafortes ou de arcos múltiplos.

Também a falta de terras com as indispensáveis qualidades, e até mesmo nas quantidades necessárias, na zona dos trabalhos ou próximo, levou a pôr de lado a construção de uma barragem de terra.

Ficou assim, como solução, a construção de um maciço de enrocamento, o que a existência de uma magnífica pedreira de granito, situada a cerca de dois quilómetros do local, muito veio facilitar.

2. A barragem é constituída por um corpo de enrocamento a granel cuja função é transmitir ao terreno de fundação as cargas devidas à pressão hidrostática; constituiu ele, por assim dizer, o elemento estabilizador da barragem.

A vedação do maciço de enrocamento é conseguida por uma cortina estanque assente no paramento de montante sobre uma almofada de enrocamento arrumado, almofada esta que serve para melhor distribuir no enrocamento a granel as cargas transmitidas pela cortina.

As infiltrações através do terreno de fundação são combatidas por uma cortina de injecções de

cimento, de profundidade variável consoante a carga hidrostática e a qualidade do terreno, sendo a ligação entre esta cortina e a de estanquidade assente sobre o paramento assegurada por um muro corta-águas em betão, vazado em vala aberta ao longo do pé do paramento de montante da barragem.

A cortina estanque é de betão armado, material que foi escolhido pelo facto de se conhecer bem o seu comportamento em realizações semelhantes, no tipo e dimensões, e também por se não encontrarem no local ou próximo, como se disse, terras apropriadas e em quantidade suficiente, caso que, a dar-se, teria certamente levado a dar preferência à construção de uma cortina estanque em terra.

3. Não são facilmente dominados pelo cálculo, e nem mesmo experimentalmente, os inúmeros problemas que a construção das barragens deste tipo levanta. Por isso, os seus projectos são estabelecidos empiricamente, com base nos ensinamentos da experiência adquirida na realização e na observação do comportamento de obras semelhantes já construídas.

O projecto da barragem de Paradela, com os seus 112 m de altura, foi inspirado no da barragem de Salt Springs, na Califórnia, de cerca de 100 m de altura, e em serviço, com resultados satisfatórios, desde 1931.

Fixou-se que o paramento de montante da barragem (face vista do enrocamento arrumado) teria a inclinação de 1,3 na horizontal para 1,0 na vertical, e que a do de jusante seria a do talude natural do enrocamento a granel, que se verificou, já durante a construção, não se afastar sensivelmente da inclinação atrás indicada.

A almofada de enrocamento arrumado é de espessura variável, com um mínimo de 3,00 m

medidos na normal ao paramento, à cota do coroa-mento, e aumentando com a profundidade segundo a lei:

$$e_a = 3,00 + 0,05 h$$

lei que conduz, para a cota mais baixa da barragem, a uma espessura de cerca de 8,60 metros, ou, medida na horizontal, aproximadamente 14,00 m.

Na execução deste enrocamento procura-se obter um conjunto homogêneo, da maior densidade possível, para o que se utilizam, dos blocos de pedra de maiores dimensões (até 10 ton e mais) que é possível transportar da pedreira, aqueles que apresentam melhores formas, isto é, tanto quanto possível faces planas; estes blocos de pedra são arrumados com o auxílio de guias, de modo que entre eles exista o maior número possível de contactos, sendo os maiores vazios preenchidos com pedras de menores dimensões, com um mínimo de cerca de 20 kg; os vazios remanescentes são cheios com brita de boa qualidade.

Também na execução deste enrocamento se procura, o que é de grande importância, que os contactos das grandes pedras que o constituem com os grandes blocos do enrocamento a granel sejam o mais numerosos e perfeitos possível, para boa transmissão das cargas da cortina estanque ao corpo da barragem.

A cortina estanque de betão armado é também de espessura variável com a profundidade, segundo a lei:

$$e_b = 0,30 + 0,00735 h$$

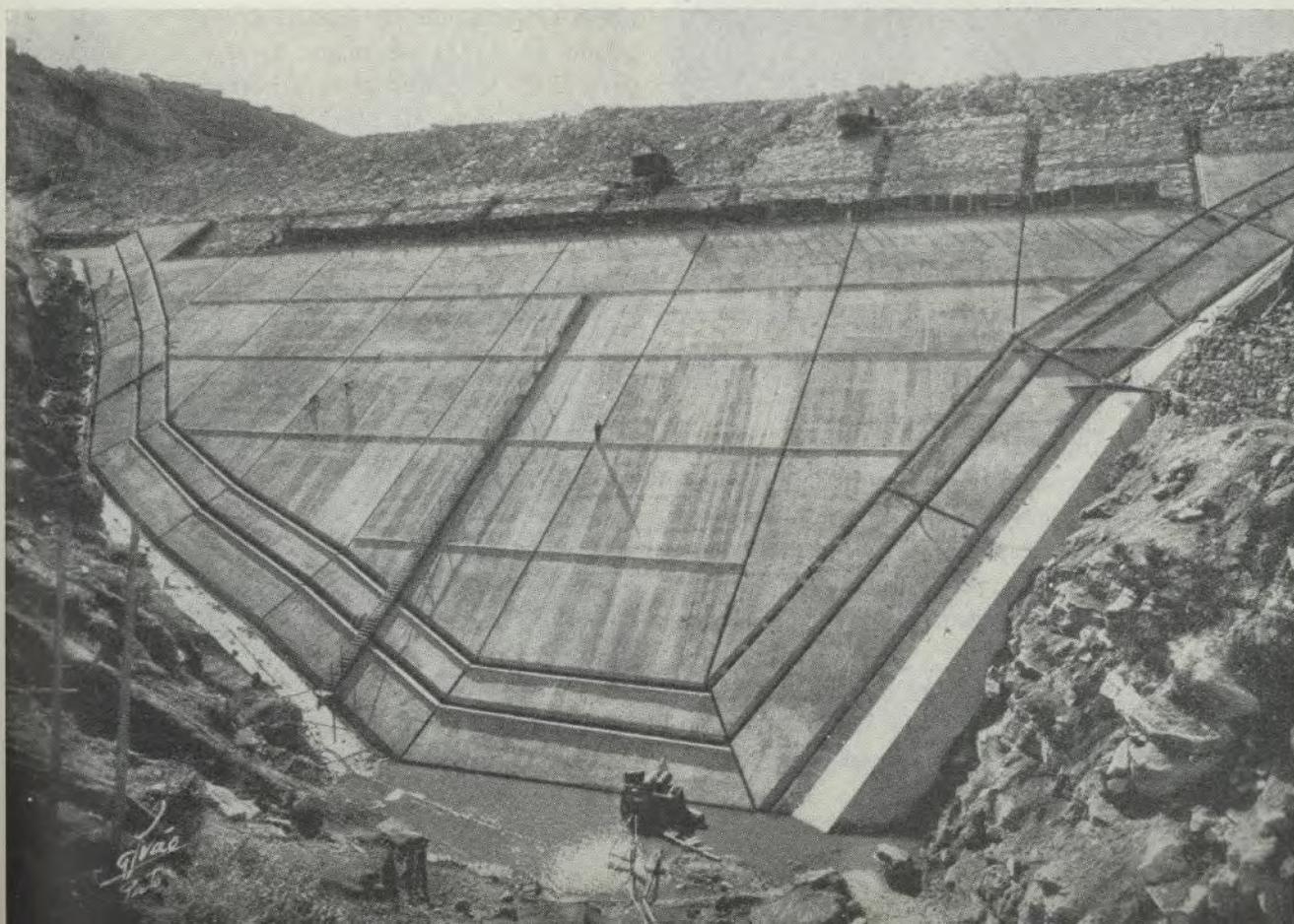
onde h é a profundidade relativamente ao coroa-mento da barragem.

Dá esta lei, por consequência, para a cortina, uma espessura variável de 0,30 m a 1,10 m, medida segundo a normal ao paramento, garantindo-se assim uma espessura de betão sempre superior a 1 % da carga hidrostática, o que se tem verificado, noutras realizações, ser suficiente para evitar a passagem de água.

Quanto à armadura, de cálculo necessariamente falível por dever basear-se na fixação de assenta-mentos relativos impossíveis de avaliar com jus-teza, é também arbitrada com base na experiência de empreendimentos semelhantes. Essa experiência tem demonstrado a suficiência de uma malha de densidade correspondente a uma secção de aço de 0,5 % da secção de betão, nas duas direcções (ho-rizantal e segundo a pendente).

Assim se tem vindo a fazer em Parabela, dis-pondo-se a armadura em uma ou duas camadas conforme a espessura de betão, e realizando-se com varões de 1" de diâmetro nas cotas mais baixas (maiores espessuras de betão) e de 3/4" na parte superior.

Fig. 1 — Aspecto da construção em Outubro de 1956. Terminada a cortina estanque até à cota 672,50 necessária para a exploração a fio de água



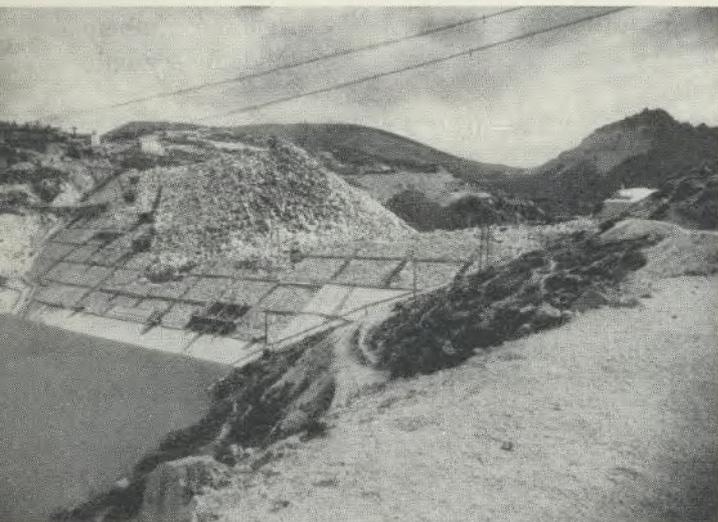


Fig. 2 — Aspecto da construção em Junho de 1957. Água na albufeira à cota 667,00. Ao fundo, à direita, a pedraira

4. A cortina de vedação do maciço de enrocamento é o ponto delicado deste tipo de barragens.

Na realidade, sofrendo os enrocamentos assentamentos de vulto, não só durante a execução devido à acção do peso próprio, mas depois também devido a esta mesma acção e à da pressão hidrostática, torna-se necessário conferir à cortina estanque a maior flexibilidade possível para que ela possa acompanhar, sem danos, aquelas grandes deformações.

Se o problema está naturalmente resolvido no caso de emprego de cortinas de terra, e, para barragens de pequena e média altura, tem solução relativamente simples no caso de emprego de materiais bastante elásticos (madeiras, aço ou betões betuminosos), complica-se quando é o betão de cimento, simples ou armado, que é chamado a desempenhar o papel de vedação, como é o caso de Paradela.

Aqui a flexibilidade é conferida dividindo a cortina em quarteladas, por meio de juntas abertas, umas segundo as linhas de nível, outras segundo as de maior declive; a vedação destas juntas é assegurada por lâminas de cobre convenientemente dobradas, embebidas no betão de quarteladas contíguas.

Demonstrou a experiência que os maiores assentamentos nas barragens de enrocamento se dão na zona central — correspondente, no geral, à sua maior altura — e a uma profundidade da ordem dos 50 a 60 % da altura contados a partir do coroa-

mento. Sendo assim, no caso de uma barragem de eixo rectilíneo e cortina estanque plana, esta, depois de deformada, quer dizer, depois de acompanhar os

assentamentos dos enrocamentos, tomaria uma forma côncava, com a concavidade voltada para montante. Como consequência, aumentaria o comprimento das linhas de nível da cortina, o que o mesmo é dizer, as juntas estabelecidas segundo as linhas de maior declive teriam tendência para abrir à medida que a cortina se deformasse, o mesmo sucedendo a qualquer eventual fenda no betão, de direcção próxima da daquelas juntas.

Há, por isso, toda a vantagem em providenciar no sentido de que a deformação geral da barragem tenda a fechar estas juntas e não a abri-las, objectivo que se consegue facilmente dando aquela, em planta, curvatura com a convexidade voltada para montante e com flecha tal que, mesmo depois de deformada, a convexidade se mantenha.

Assim se está fazendo em Paradela, onde a directriz em planta não é circular como é habitual, mas sim constituída por dois ramos de hipérbole tangentes no vértice.

Esta disposição permitiu concentrar a maior curvatura na parte central da barragem, onde, à cota onde os assentamentos serão maiores, as cordas dos arcos entre as margens têm menor desenvolvimento.

Deve notar-se que, no caso de Paradela, e por razões de ordem geológica que se prendiam com a implantação do muro corta-águas em rocha de boa qualidade, a curvatura é superior à que seria necessária pela simples consideração dos assentamentos.

Enquanto que, como vimos, no caso da cortina plana e barragens de eixo rectilíneo, as juntas segundo as linhas de maior declive têm tendência para abrir ao deformar-se a barragem, por alongamento das linhas de nível da cortina, o mesmo não acontece com as juntas estabelecidas segundo estas linhas, pois a cortina não está amarrada ao coroa-

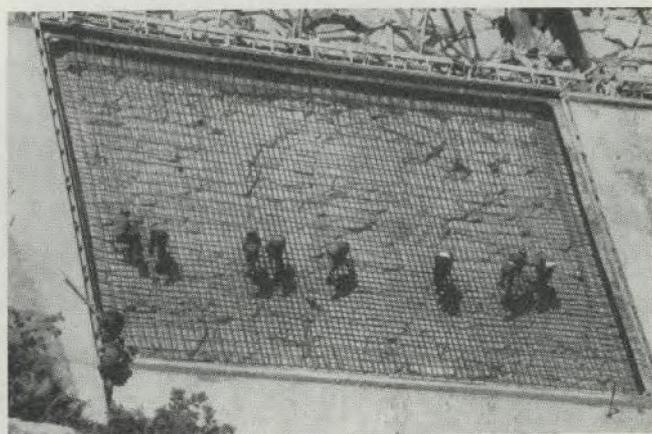


Fig. 3 — Colocação das armaduras numa das lages. Nota-se à direita e em cima, a lamina da cobre já colocada

mento da barragem, e pode, portanto, acompanhar os assentamentos sem aumento do seu comprimento.

Demonstra a experiência que nas cortinas de betão as juntas estabelecidas segundo as linhas de nível tendem a fechar, e que, por vezes mesmo se dá, nas proximidades da junta, o esmagamento do betão por compressão. E sendo assim, a execução da cortina também com convexidade segundo planos verticais, isto é, com as linhas de maior declive curvilíneas com convexidade para montante, poderia conduzir a riscos de enfunamento sob a acção das forças que lhe provocam as compressões, quando a albufeira está vazia.

Por isso em Salt Springs se construiu a cortina com as linhas de maior declive ligeiramente curvilíneas, mas com concavidade para montante, isto é, dando-lhe desde logo uma forma semelhante à que viria a tomar depois de deformada.

Noutras barragens mais recentes, porém, como Bear River, a cortina foi executada com as linhas de maior declive rectilíneas. Foi assim que se projectou e está executando a cortina de Paradela.

Como se pode apreciar no desenho que constitui a figura 7, o número de juntas segundo as linhas de nível na barragem de Paradela é de 14, com espaçamentos de cerca de 10 e 15 metros, sendo o menor correspondente à parte baixa e central da barragem, onde são de esperar os maiores assentamentos; segundo as linhas de maior declive, as juntas estão espaçadas de 16 metros. Também no mesmo desenho se pode apreciar o pormenor dos diferentes tipos de juntas.

A lâmina de cobre, que é, como se disse, o elemento de vedação das juntas, é de 1,5 mm de espessura nas situadas abaixo da cota 690,50, e de 1,0 mm nas restantes; a aba que fica embebida no betão é de dimensão variável consoante a junta de que se trata e a sua posição em cota: de 274 e 224 mm conforme se situa abaixo ou acima da cota 690,50 nas juntas segundo as linhas de maior declive⁽¹⁾, é, nas juntas segundo as linhas de nível⁽¹⁾, de 281 mm abaixo da cota já referida, e de 231 mm acima da mesma cota.

Nas juntas segundo as linhas de nível, todas de 2,5 centímetros de abertura, preenche-se esta com madeira, cuja função é absorver, pela sua grande elasticidade, uma parte da deformação da cortina que, como se viu, tende a fechar estas juntas; procura-se assim evitar o esmagamento do betão na proximidade destas juntas, fenómeno que se verificou em cortinas já construídas e experimentadas, ao mesmo tempo que se facilita, sem o inconveniente já referido, a rotação de lajes contíguas.

Para evitar o esmagamento do fole da lâmina de cobre quando a junta fecha, coloca-se junto deste e colado a ele, de um lado, uma tira de «ruberoid», e do outro, uma tira de aglomerado negro de cortiça.

Nas juntas segundo as linhas de maior declive (verticais), a abertura é de 7 e 5 centímetros na zona central da barragem, de maior curvatura, e de 2,5 centímetros nas zonas laterais e inferior.

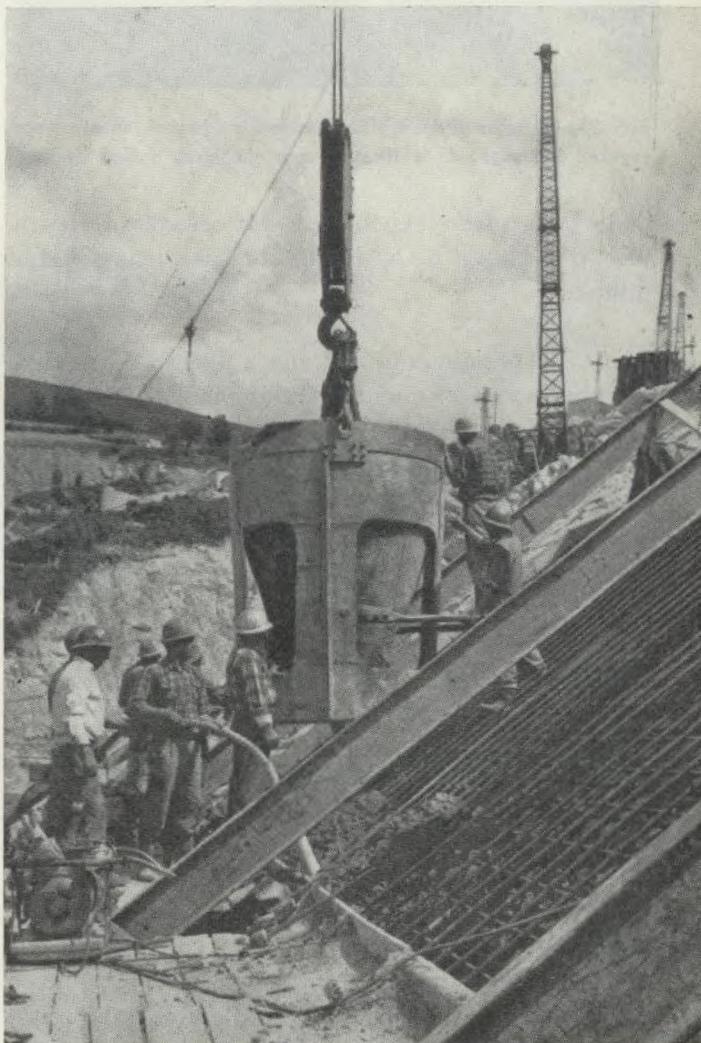


Fig. 4 — Betonagem de uma laje. Vêm-se as vigas metálicas de deslização da cofragem

A jusante da lâmina de cobre, a abertura da junta é preenchida com aglomerado negro de cortiça, e o fole da lâmina é protegido contra o esmagamento do mesmo modo que nas juntas horizontais.

A montante da lâmina de cobre a abertura das juntas alarga-se para 20 e 15 cm (respectivamente abaixo e acima da cota 690,50), alargamento que

⁽¹⁾ Por comodidade de designação, e por as juntas segundo as linhas de nível serem horizontais, chamam-se, nos desenhos, às juntas segundo as linhas de maior declive, verticais.



Fig. 5 — Pormenor de um cruzamento de juntas, com a peça especial de ligação de lâminas de cobre já ligada a duas lâminas

poderá vir a ser preenchido, se fôr caso disso, e para melhor garantia de vedação, com argamassa betuminosa.

5. É especialmente delicada a ligação da cortina estanque com o muro corta-águas da barragem.

Com efeito, à cortina procura dar-se, como vimos, a maior flexibilidade possível para que acompanhe os inevitáveis assentamentos do enrocamento, que atingem o máximo na zona central da barragem, mas que se degradam lentamente. O muro corta-águas, porém, é fixo e praticamente indeformável, e, por consequência, junto dele, a cortina poderá vir a sofrer deformações diferenciais importantes.

Na barragem de Salt Springs, já anteriormente referida, verificou-se, nos primeiros anos da sua vida, na região próxima da inserção da cortina com o corta-águas, o aparecimento de numerosas fendas de direcção aproximadamente paralela àquela inserção, facto que se atribuiu a excessiva rigidez da cortina numa zona de fortes assentamentos diferenciais.

Procurou-se, por isso, em realizações posteriores, conferir à cortina ainda maior flexibilidade nessa zona, com a criação de juntas perimetrais, paralelas à de ligação com o corta-águas, constituindo como que um caixilho articulado onde se insere então a cortina.

Assim, na barragem de Bear River, foi instalada na cortina uma junta perimetral, facto que muito reduziu o aparecimento daquelas fendas.

Em Paradela a cortina está sendo executada com duas juntas perimetrais; uma, a 4,50 m da de ligação com o corta-águas, vai até cerca da cota 725,00; a segunda, situada a 3,00 m da anterior, portanto a 7,50 m da junta com o corta-águas, termina à cota 695,00 aproximadamente.

A existência dos grandes assentamentos diferenciais referidos obriga a dar, às juntas perime-

trais e à de inserção com o corta-águas, disposição que lhes permita não só poder abrir ou fechar como as restantes, mas ainda sofrer mais fortes rotações do que estas.

Um outro fenómeno ocorre ainda nalgumas barragens de enrocamento, e é o caso da de Paradela, que influencia o tipo de junta a aplicar na inserção com o corta-águas, e nas lajes perimetrais.

Com efeito, no caso de barragens de grande altura em vales relativamente apertados, nota-se uma tendência de escorregamento dos enrocamentos das encostas para o meio do vale.

Este movimento dos enrocamentos arrasta consigo a cortina estanque, e vai, por consequência, provocar como que um deslizamento desta sobre o corta-águas, que, rígido como é, e encastrado na fundação, se pode considerar como fixo, como se disse já; e o mesmo deslizamento poderá ocorrer nas juntas perimetrais.

A lâmina de cobre, de qualquer modo que se dobre, dificilmente acompanha este deslizamento, que poderá mesmo, se atingir valores elevados, conduzir ao rasgamento da lâmina e à falência do sistema de vedação, problema que se põe com mais acuidade na junta de inserção da cortina com o corta-águas, onde, por este ser fixo, os deslizamentos diferenciais serão maiores.

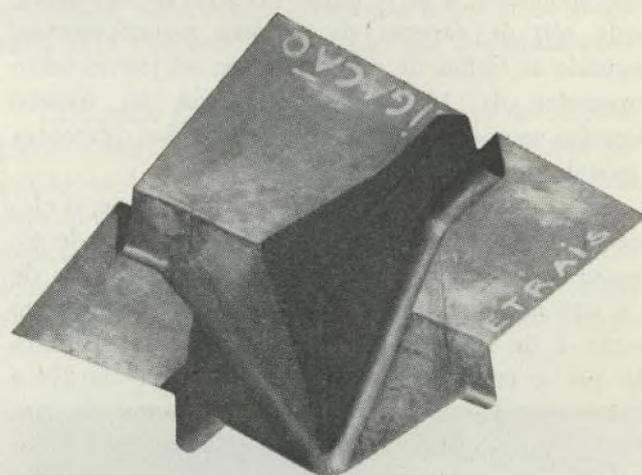
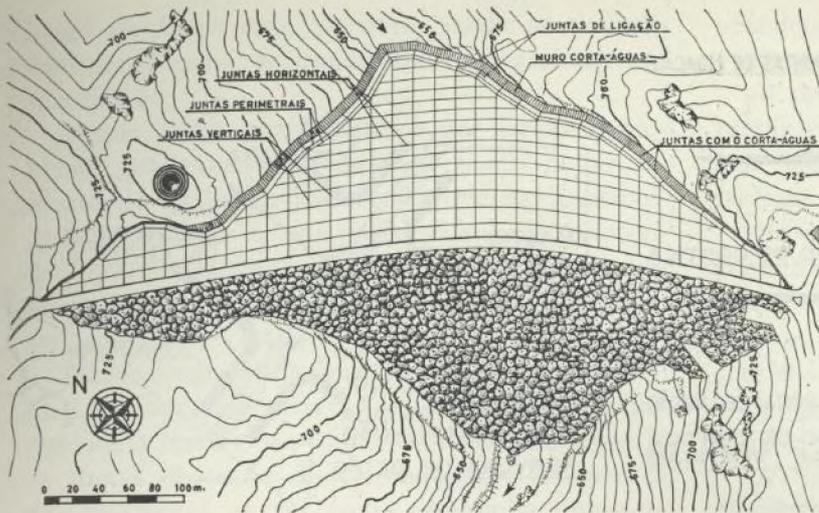


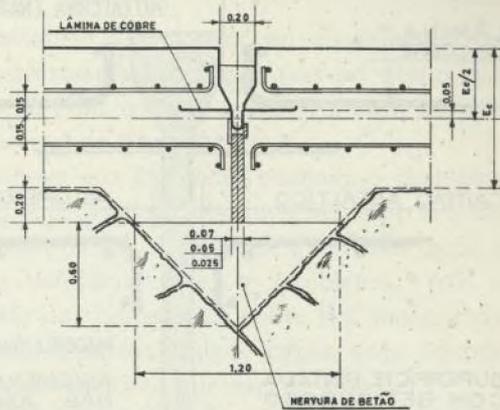
Fig. 6 — Peça de ligação das lâminas de cobre nos cruzamentos

Em algumas barragens americanas, Bear River, por exemplo, procurou-se obviar a este inconveniente solidarizando, por meio de um endentado, a laje perimetral e o muro corta-águas, de modo a impedir aqueles deslizamentos; equivale isto, no entanto, a transferir o problema da junta de ligação com o corta-águas, para a junta perimetral.

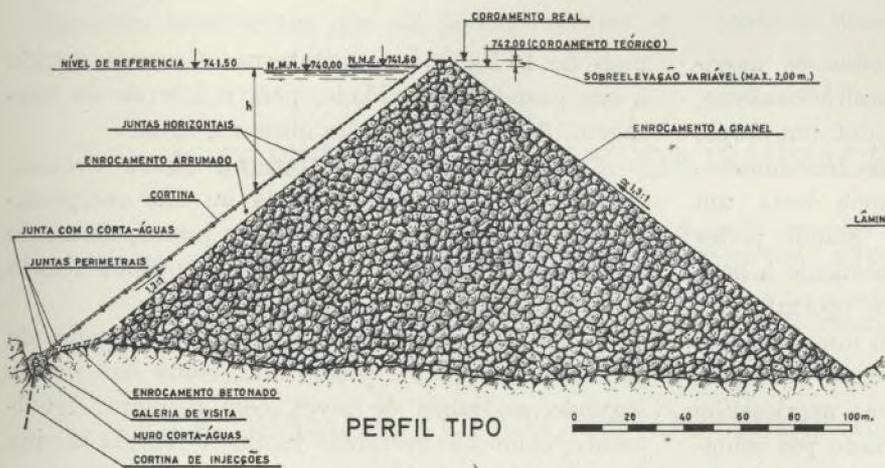
Em Paradela, de preferência a uma solução deste tipo, procurou dar-se a estas juntas — de ligação ao corta-águas e perimetrais — disposição



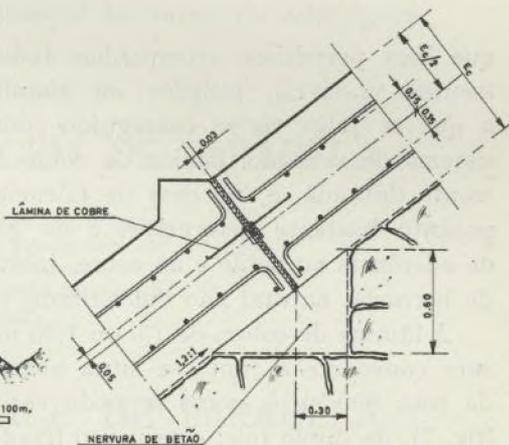
PLANTA



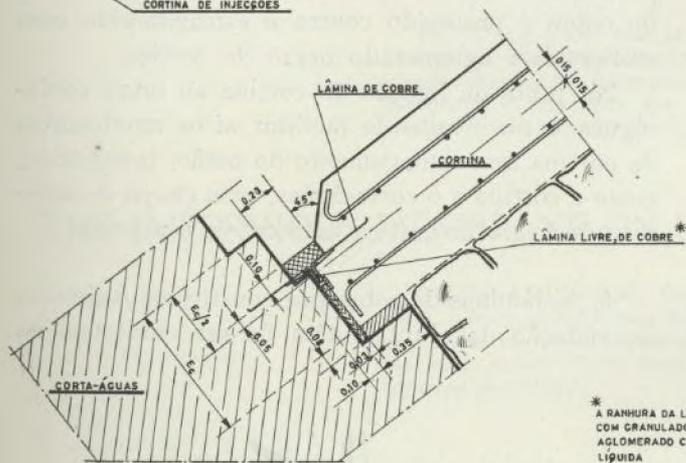
JUNTAS VERTICAIS E DE LIGAÇÃO



PERFIL TIPO

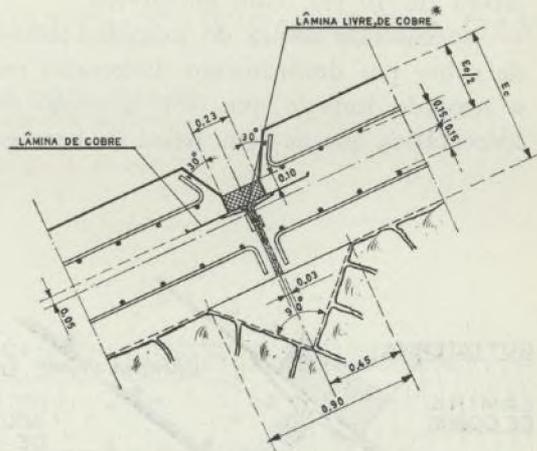


JUNTAS HORIZONTAIS

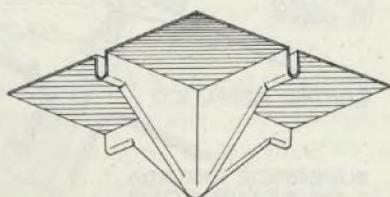


JUNTAS COM O CORTA ÁGUAS

ESCALA DOS PORMENORES
0 0,50 1,00m.



JUNTAS PERIMETRAIS



PEÇA TIPO NUM CRUZAMENTO
DE LÂMINAS DE COBRE

* A RANHURA DA LÂMINA ENCHE-SE
COM GRANULADO DE CORTIÇA
AGLOMERADO COM GUTTATERNA
LÍQUIDA

Nota — Para melhor compreensão dos pormenores
das juntas vejam-se os quatro croquis da página 24

Fig. 7

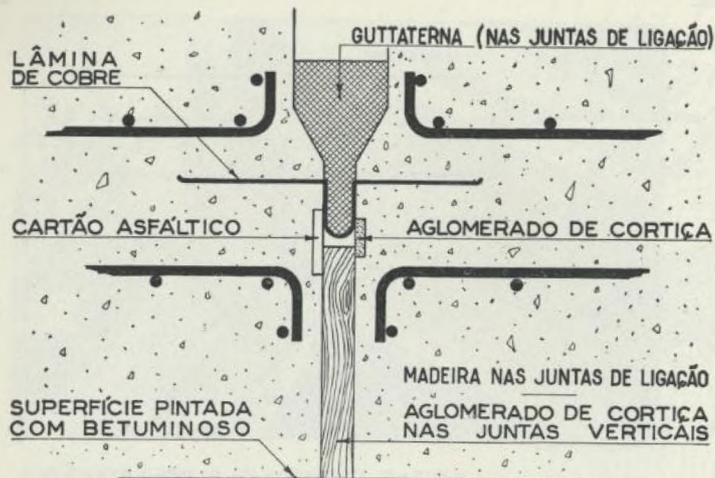


Fig. 7-I — Pormenor das juntas verticais e de ligação

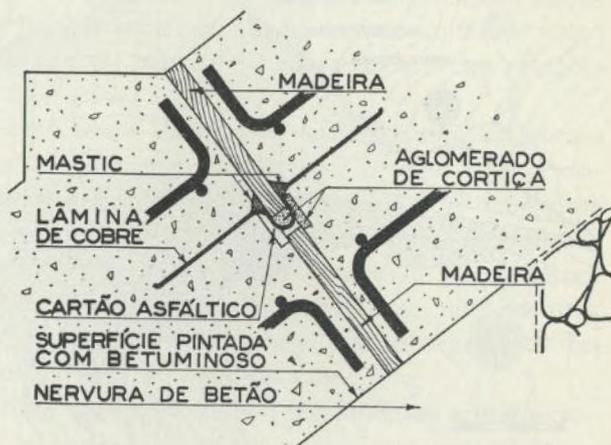


Fig. 7-II — Pormenor das juntas horizontais

que lhes permitisse acompanhar todos os movimentos possíveis, isolados ou simultâneamente, o que se julga ter-se conseguido com um duplo sistema de vedação: lâmina de cobre convenientemente dobrada, e, no caso de falência desta, um produto bastante deformável e de grande poder de aderência ao betão e ao cobre, fabricado à base de borracha natural não vulcanizada (guttaterna).

A lâmina de cobre, de 1,5 ou 1,00 mm de espessura consoante a junta se situa abaixo ou acima da cota 690,50, é, como se pode ver no desenho (fig. 7), de duplo fole: o primeiro fixado por soldadura às abas de cobre embebidas no betão, o outro, solto no interior do primeiro, é ainda recoberto pela extremidade livre das duas abas.

Imediatamente acima da lâmina de cobre, a abertura das juntas é de 23 cm, e é cheia, numa altura de 10 cm, com guttaterna.

No caso de rotura do primeiro fole da lâmina de cobre por deslizamento diferencial importante, o segundo impede que, sob a acção da pressão hidrostática que na zona baixa da barragem atinge

mais de 10 kg/cm² a guttaterna se escape, devido à sua grande plasticidade, para o interior da barragem, deixando caminho aberto à água.

Como protecção à guttaterna contra o calor, quando a albufeira está vazia ou não completamente cheia, corre-se ao longo das juntas, deixando apenas uma abertura de 5 cm, uma tábua fixada por pequenos grampos a uma das lajes.

A abertura destas juntas, abaixo da lâmina de cobre, é de 3 cm, e preenchida, como nas juntas segundo as linhas de nível, com madeira. Igualmente, como nas restantes juntas, o fole da lâmina de cobre é protegido contra o esmagamento com «ruberoid» e aglomerado negro de cortiça.

Na junta de ligação da cortina ao muro corta-águas, e no intuito de facilitar aí os movimentos da cortina sem esmagamento do betão, interpõe-se, entre a cortina e o corta-águas, uma chapa de aglomerado negro de cortiça de 8 cm de espessura.

6. As lâminas de cobre que constituem o sistema de vedação das juntas, têm de ser contínuas ao

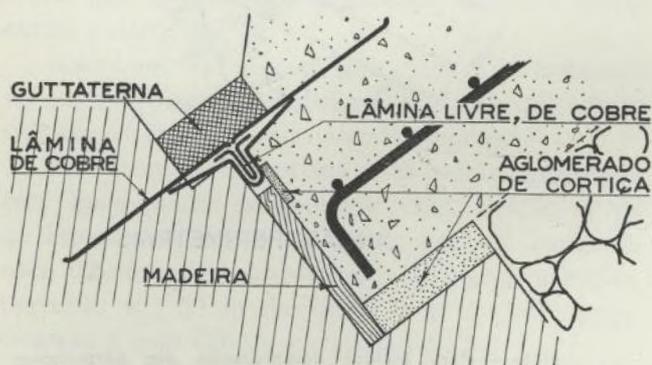


Fig. 7-III — Pormenor das juntas com o corta águas



Fig. 7-IV — Pormenor das juntas perimetrais

longo de todas elas. Só deste modo se poderão considerar como desempenhando integralmente a sua missão.

Sendo assim, compreende-se que constitui problema particularmente difícil o ponto de cruzamento de quaisquer juntas. Há que dar continuidade às lâminas de cobre que aí afluem, independentemente das suas formas e dimensões, e dos movimentos a que possam estar sujeitas e que podem ser contrários: uma junta abrir e a outra fechar.

Nas barragens americanas até hoje construídas, (Salt Springs, Bear River, Dix), tem-se dado continuidade à lâmina das juntas estabelecidas segundo as linhas de maior declive, enquanto nos pontos de cruzamento, as das juntas segundo as linhas de nível foram espalmadas e depois soldadas às primeiras. Ignoravam-se assim, propositadamente, os diferentes movimentos que ali podiam ocorrer, e

abandonou-se, por assim dizer, a lâmina de cobre à sua sorte.

E procedeu-se assim quer no cruzamento das juntas anteriormente referidas, quer no destas com a de inserção com o corta-águas, ou com as perimetrais no caso de Bear River.

Procurou-se, em Paradela, resolver o problema, criando umas peças especiais, mostradas no desenho e na fotografia da fig. 6. Julga-se que deste modo se resolveu satisfatoriamente o problema, pois a continuidade das lâminas de cobre fica assegurada, e a peça tem deformabilidade capaz de a adaptar a todos os movimentos que são de esperar.

A cada cruzamento corresponde uma peça diferente, que deve respeitar a orientação das juntas que ali afluem, havendo mesmo peças com apenas 3 ramos, como as dos cruzamentos com a junta de inserção da cortina no corta-águas.

A CORTINA ESTANQUE DA BARRAGEM DE PARADELA

RESUMO—*Descrevem-se muito sumariamente a barragem de Paradela, do tipo de enrocamentos a granel com cortina estanque de betão armado assente sobre o paramento de montante, e os dispositivos de vedação das juntas abertas que conferem à cortina a indispensável flexibilidade.*

LE MASQUE ÉTANCHE DU BARRAGE DE PARADELA

RÉSUMÉ—*On fait la description très sommaire du barrage de Paradela, du type en enrochements en vrac avec masque étanche en béton armé sur le parament amont, et des dispositifs d'étanchéité des joints ouverts qui donnent au masque l'indispensable flexibilité.*

THE IMPERVIOUS MEMBRANE ON UPSTREAM FACE OF PARADELA DAM

SUMMARY—*This paper describes briefly Paradela Dam, a loose rock-fill dam with reinforced concrete impervious membrane on the upstream face, and the water seals used in the open joints of the concrete face in order to provide the required flexibility.*

5.º CONGRESSO INTERNACIONAL DAS GRANDES BARRAGENS

PARIS, MAIO - JUNHO DE 1955

A Secretaria da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens pede-nos que tornemos público, que o preço do «compte rendu» do 5.º Congresso Internacional das Grandes Barragens, realizado em Paris, em Maio/Junho de 1955, foi modificado, por motivo de força maior.

O seu preço é dólares \$38,00 U. S. ou Francos franceses 13.300,00.

Os pedidos devem ser feitos ao «Secretariado da Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens», acompanhados do respectivo cheque, pagável em Paris, à ordem da «Commission Internationale des Grands Barrages».