



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA
Área Departamental de Engenharia Civil



ESTUDO HIDRÁULICO EM MODELO REDUZIDO DE DESCARREGADORES DE CHEIAS: UTILIZAÇÃO DE CONCHAS DE ROLO NA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA DO ESCOAMENTO

MATEUS MENDONÇA

Bacharel em Engenharia Civil

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Área de
Especialização de Hidráulica

Orientador (es):

Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos
Doutora Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Júri:

Presidente: Doutora Carla Maria Duarte da Silva e Costa

Vogais:

Mestre Alexandre Almeida Mendes Borga
Doutor João Alfredo Ferreira dos Santos
Doutora Elsa Cristina Tavares Lourenço Alves

Novembro 2013

Resumo

A principal finalidade dos descarregadores de cheias de barragens consiste em dar passagem adequada ao excesso de água que aflui às albufeiras. Para tal os descarregadores deverão ser dimensionados de forma a garantir a adequada restituição ao leito do rio dos caudais descarregados.

O estudo em modelo reduzido de descarregadores de cheia de barragens é fundamental no apoio ao projecto destas obras, por permitir a análise de fenómenos hidráulicos de difícil caracterização analítica, associada à complexidade das formas das próprias estruturas bem como as da topografia do terreno em que elas se inserem. No caso das obras hidráulicas associadas a barragens é comum o estudo em modelo reduzido de descarregadores de cheias, tomadas de água e circuitos hidráulicos.

O objectivo principal do presente estudo é a análise do funcionamento hidráulico de dois tipos de conchas de rolo na dissipação de energia do escoamento. Esta análise é baseada nos resultados experimentais obtidos num modelo físico de um caso real.

Com base nos ensaios de dois tipos de conchas de rolo, com e sem blocos, analisaram-se as condições de escoamento e as diferenças induzidas nas erosões do leito a jusante do descarregador, tendo sido escolhida a solução mais adequada, em termos de condições de escoamento tranquilas na zona de restituição e às menores erosões do leito.

Palavras-chave: Modelos físicos, barragens, descarregadores de cheias, conchas de rolo, erosões no leito do rio.

ABSTRACT

The main purpose of dam's spillways is to provide a suitable passage of the water in excess that arrives to the reservoirs. Therefore, spillways should be designed to ensure adequate restitution to the riverbed of the flows discharged.

A scale model study of a dam spillway is essential in supporting the project of these works, allowing the analysis of hydraulic phenomena of difficult analytical characterization, associated with the complexity regarding shapes of the structures, as well as the topography of the land on which they are inserted. In the case of hydraulic works associated with dams it is common the study, with reduced model of flood spillways, inlets and hydraulic circuits.

The main objective of the present study is the analysis of the hydraulic behavior of two types of roller buckets in the energy dissipation of the flow. This analysis is based on experimental results obtained in a physical model of a real case.

Based on the tests of two types of roller buckets, with and without blocks, the flow conditions and the differences induced on erosions of the riverbed downstream of the discharger were analyzed, and the best solution in terms of quiet flow conditions in the restitution zone and lower riverbed erosion was chosen.

Keywords: Reduced physical models, dams, spillway, roller buckets, erosion on the riverbed.

Agradecimentos

Durante a execução desta Dissertação, contei com a colaboração e o apoio de pessoas, para as quais aproveito esta oportunidade para destacar aqueles cujos contributos reconheço terem sido preponderantes para a sua conclusão.

Agradeço à Doutora Elsa Alves orientadora da Dissertação a sua dedicação e empenho, não só na estruturação e transmissão dos seus conhecimentos, como todas as sugestões e apoio, os quais contribuíram para a execução deste trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor João Alfredo Santos, orientador desta Dissertação pelo apoio e prontidão nas respostas às questões mais pertinentes, permitindo ultrapassar várias etapas à execução da mesma. A sua colaboração foi indispensável para a valorização e enriquecimento deste trabalho.

À minha família, pois são as pessoas que estão sempre comigo, independentemente das dificuldades, e que me transmitem os maiores ensinamentos. Espero que se sintam recompensados pelas minhas conquistas.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS	1
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TEXTO.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1	DESCARREGADORES DE CHEIAS	3
2.1.1	Função do descarregador.....	3
2.1.2	Tipos de descarregadores de cheia.....	5
2.2	OBRAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA	10
2.2.1	Concha de rolo	11
3	DESCRIÇÃO DO MODELO REDUZIDO.....	19
3.1	BREVE DESCRIÇÃO DA BARRAGEM E RESPECTIVOS ÓRGÃOS HIDRÁULICOS.....	19
3.2	ELEMENTOS DO MODELO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	19
3.3	EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO E DE REGISTO	26
3.4	RELAÇÕES DE SEMELHANÇA	30
3.5	EFEITOS DE ESCALA.....	31
3.6	EXPLORAÇÃO DO MODELO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS.....	32
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS	34
4.1	ENSAIOS REALIZADOS.....	34
4.2	ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO NA SOLEIRA DO DESCARREGADOR	34
4.3	ANÁLISE DA SOLUÇÃO CONCHA DE ROLO.....	37
4.3.1	Considerações gerais.....	37
4.3.2	Solução A.....	39
4.3.3	Solução B.....	43
4.3.4	Solução C.....	48
4.3.5	Solução D.....	53
4.3.6	Solução E.....	58
4.3.7	Comparação entre as soluções C, D e E.....	62
5	CONCLUSÕES	67
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
	ANEXO	70

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Valores da curva de vazão do descarregador.....	35
Quadro 2 – Geometrias de concha de rolo.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1–Caracterização geométrica de uma concha de rolo sem blocos (Pinheiro, 2006) ..	12
Figura 2 –Funcionamento hidráulico de uma concha de rolo sem blocos(Pinheiro, 2006)....	12
Figura 3–Caracterização geométrica de uma concha de rolo com blocos(Pinheiro, 2006) ...	13
Figura 4 – Funcionamento hidráulico de uma conchade rolo com blocos(Pinheiro, 2006)....	14
Figura 5– Influência do nível de jusante no funcionamento hidráulico das conchas de rolo(Pinheiro, 2006).....	15
Figura 6 – Conchas de rolo (a) sem blocos, (b) com blocos	16
Figura 7–Conchas de rolo. Ábacos de dimensionamento (adaptado por Pinheiro 2006 de USBR, 1987)	18
Figura 8 – Esquema geral do modelo.....	20
Figura 9 – Curva de vazão. Abertura total das comportas	35
Figura 10 – Curva de vazão do descarregador. Aberturas parciais das comportas	36
Figura 11– Perfil longitudinal do leito para $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$	63
Figura 12 – Perfil longitudinal do leito para $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$	64
Figura 13–Perfil longitudinal do leito para $Q= 2000 \text{ m}^3/\text{s}$	65
Figura 14–Perfil longitudinal do leito para $Q= 2750 \text{ m}^3/\text{s}$	66

ÍNDICE DE FOTOGRAFIAS

Foto 1– Barragem do Alto Ceira	5
Foto 2– Barragem da Aguieira.....	6
Foto 3– Barragem de Cahora Bassa	7
Foto 4– Barragem Malhada do Peres.....	7
Foto 5–Barragem de Beliche	8
Foto 6–Barragem da Paradela	9
Foto 7–Barragem de Alqueva.....	9
Foto 8–Vista geral do modelo reduzido e seus aspectos principais.....	21
Foto 9–Elementos para a tranquilização do escoamento na entrada da albufeira	22
Foto 10 – Comporta a jusante	23
Foto 11– Comportas de segmento do descarregador.....	23
Foto 12–Fase de construção do modelo. Representação da topografia do terreno na zona da albufeira	24
Foto 13–Modelação da soleira do descarregador	25
Foto 14 –Soleira descarregadora	25
Foto 15 –Concha de rolo (base de fixação e dentes)	26
Foto 16–Elemento primário e secundário do caudalímetro.....	27
Foto 17 – Hidrómetro de ponta graduado	28
Foto 18– Tubo graduado para medição de alturas de água	28
Foto 19 – Quadro de pressão.....	29
Foto 20 – Solução A. Escoamento do caudal 500 m ³ /s	39
Foto 21 – Solução A. Escoamento do caudal 1000 m ³ /s	40
Foto 22 – Solução A. Erosão do leito para o caudal 1000 m ³ /s	40
Foto 23 – Solução A. Escoamento do caudal 2000 m ³ /s	41
Foto 24–Solução A. Erosão do leito para o caudal 2000 m ³ /s	41
Foto 25 –Solução A. Escoamento do caudal 2750m ³ /s.....	42
Foto 26–Solução A. Erosão do leito para o caudal 2750 m ³ /s	43
Foto 27 – Solução B. Escoamento do caudal 500 m ³ /s	44
Foto 28–Solução B. Erosão do leito para o caudal 500 m ³ /s	44
Foto 29–Solução B. Escoamento do caudal 1000 m ³ /s	45
Foto 30–Solução B. Erosão do leito para o caudal 1000 m ³ /s	46
Foto 31 – Solução B. Escoamento do caudal 1500 m ³ /s	46

Foto 32–Solução B. Erosão do leito para o caudal 1500 m ³ /s	47
Foto 33–Solução B. Escoamento do caudal 2750 m ³ /s	47
Foto 34– Solução B. Erosão do leito para o caudal 2750 m ³ /s	48
Foto 35–Solução C. Escoamento do caudal 500 m ³ /s	49
Foto 36–Solução C. Erosão do leito para o caudal 500 m ³ /s	49
Foto 37–Solução C. Escoamento do caudal 1000 m ³ /s	50
Foto 38 – Solução C. Erosão do leito para o caudal 1000 m ³ /s	50
Foto 39 – Solução C. Escoamento do caudal de 2000 m ³ /s	51
Foto 40 – Solução C. Erosão do leito para o caudal de 2000 m ³ /s	52
Foto 41 – Solução C. Escoamento do caudal 2750 m ³ /s	52
Foto 42 – Solução C. Erosão do leito para o caudal 2750 m ³ /s	53
Foto 43 – Solução D. Escoamento do caudal de 500 m ³ /s	54
Foto 44 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 500 m ³ /s	54
Foto 45 – Solução D. Escoamento do caudal 1000 m ³ /s	55
Foto 46 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 1000 m ³ /s	55
Foto 47 – Solução D. Escoamento do caudal 2000 m ³ /s	56
Foto 48 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 2000 m ³ /s	56
Foto 49 – Solução D. Escoamento do caudal 2750 m ³ /s	57
Foto 50 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 2750 m ³ /s	58
Foto 51- Solução E. Escoamento do caudal 2000 m ³ /s	59
Foto 52 – Solução E. Erosão do leito para o caudal 2000 m ³ /s	59
Foto 53 – Solução E. Escoamento do caudal 2750 m ³ /s	60
Foto 54 – Solução E. Erosão do leito para o caudal 2750 m ³ /s	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO E OBJECTIVOS

Os modelos reduzidos são ferramentas com grande interesse na engenharia civil, em particular no apoio ao projecto de obras hidráulicas, por permitirem o estudo de fenómenos hidráulicos de difícil caracterização analítica associados à complexidade das formas das próprias estruturas bem como as da topografia do terreno em que elas se inserem. No caso das obras hidráulicas associadas a barragens é comum o estudo em modelo reduzido de descarregadores de cheias, tomadas de água e circuitos hidráulicos.

Os descarregadores de cheia de barragens são, em geral, constituídos por uma estrutura de entrada, um troço intermédio de ligação, uma zona de dissipação de energia e um trecho de restituição do escoamento ao leito do rio. Estes elementos compreendem diferentes estruturas dimensionadas em função das características hidráulicas e hidrológicas, das características da barragem, da configuração topográfica a montante e a jusante do vale, da natureza geológica do maciço de fundação e das condições de acesso para operação do equipamento hidromecânico ou por necessidade de passagem de uma rodovia. (Lemos,1981).

Apesar da existência de critérios e práticas consagradas no dimensionamento hidráulico de descarregadores de cheias, a complexidade dos fenómenos hidráulicos envolvidos e a importância dos outros aspectos anteriormente referidos, recomendam, em muitas situações, a realização de ensaios hidráulicos em modelo reduzido para avaliar o funcionamento das formas projectadas e, eventualmente, propor ajustes.

Por outro lado, sempre que as condições de dimensionamento se afastem dos limites de validade dos critérios existentes na literatura ou se proponham novas soluções, a utilização do modelo reduzido é recomendada.

Os estudos hidráulicos em modelo reduzido de obras de dissipação de energia incluem, fundamentalmente, os estudos de bacias de dissipação por ressalto, de conchas de rolo e as bacias de dissipação por jactos. Para além da análise do funcionamento hidráulico das estruturas é importante a análise da acção erosiva no leito do rio a jusante das estruturas, associada à energia residual do escoamento.

O objectivo principal do presente estudo é a análise do funcionamento hidráulico de dois tipos de conchas de rolo na dissipação de energia do escoamento. Esta análise é baseada nos resultados experimentais obtidos num modelo reduzido de um caso real.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

A Dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos. Após o Capítulo de Introdução, apresenta-se no Capítulo 2 a revisão bibliográfica. No Capítulo 3 descreve-se o modelo reduzido em estudo e no Capítulo 4 analisam-se os resultados obtidos no modelo. As conclusões do estudo são apresentadas no Capítulo 5.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 DESCARREGADORES DE CHEIAS

2.1.1 Função do descarregador

A principal finalidade dos descarregadores de cheias consiste em dar passagem adequada ao excesso de água que aflui às albufeiras. Para tal os descarregadores deverão garantir que não sejam ultrapassados determinados níveis fixados de acordo com as normas de segurança das barragens (Lemos, 1981).

Se o descarregador de cheias não cumpre esta função, a barragem poderá ser galgada e a sua estabilidade ficará comprometida, podendo eventualmente verificar-se o seu colapso. Mesmo que não produza o galgamento da barragem, uma subida exagerada dos níveis da água poderá causar inundações a montante. A passagem, através do descarregador, de caudais superiores ao máximo previsto poderá causar, a jusante, prejuízos importantes, designadamente erosões localizadas mais profundas e extensas e inundações mais graves. Para além destes aspectos, não são de excluir danos na própria estrutura do descarregador, como sejam os resultantes do galgamento das paredes do canal, da entrada em carga de um túnel que deveria funcionar com superfície livre, da ocorrência de um ressalto descontrolado, do mau funcionamento de concha de rolo ou da separação do escoamento.

Por outro lado os descarregadores sobredimensionados são, como é evidente, antieconómicos.

É portanto, fundamental que as estruturas do descarregador tenham capacidade de vazão suficiente para deixar passar as cheias afluentes, eventualmente modificadas pelo efeito regularizador das albufeiras, sem exceder determinados níveis máximos permissíveis e sem pôr em risco a sua própria estrutura ou outras estruturas do aproveitamento em que se integra. Sendo os descarregadores órgãos importantes para a segurança das albufeiras, o seu dimensionamento requer uma certa,

experiência do projectista para ponderar a influência dos vários factores ligados à concepção de tais estruturas hidráulicas.

A escolha da solução que levará à adopção de um tipo de descarregador a implantar em sítio adequado implica, em geral, um estudo aprofundado das características geotécnicas do local. De um modo geral um salto de esqui exige um maciço rochoso de melhores características geotécnicas do que uma dissipação de energia por ressalto ou uma concha de rolo. Numa rocha branda é certamente mais económico escavar um canal, a revestir posteriormente, em que a secção transversal seja trapezoidal, do que construí-lo com paredes verticais.

O dimensionamento das soleiras descarregadoras faz-se a partir de um estudo económico onde entram como variáveis a carga de funcionamento H , o custo da barragem em função da altura, os custos das comportas e das expropriações, a capacidade de amortecimento da ponta de cheia e as exigências relativas às características do escoamento a jusante. No dimensionamento devem ser conhecidos o hidrograma de cheias, a variação da capacidade de armazenamento e da área inundada da albufeira com a cota de retenção, e a curva de vazão natural do rio a jusante da restituição.

Do estudo económico resulta a fixação da carga máxima sobre a soleira H . O comprimento da soleira L é obtido por intermédio da expressão que dá o caudal $Q = \mu L \sqrt{2g} H^{3/2}$. Nesta expressão μ é o coeficiente de vazão, que é função da geometria da soleira e do grau de depressão. Fixado o grau de depressão η , obtêm-se a carga de dimensionamento H_0 a partir da relação $\eta = \frac{H}{H_0}$. A fixação do grau de depressão depende dos riscos de cavitação e de separação.

Um descarregador de soleira (delgada, espessa ou normal) compreende normalmente uma estrutura que assegura a entrada de caudal e um canal ou galeria que conduz a água de montante para a jusante da barragem; termina geralmente por uma obra dissipadora de energia que minimize os efeitos erosivos no leito e nas margens a jusante do descarregador.

2.1.2 Tipos de descarregadores de cheia

No corpo da barragem -Descarregador de lâmina livre

Os descarregadores sobre barragens (Foto 1 e Foto 2) são tradicionalmente utilizados nas barragens de betão ou de alvenaria de pedra, sendo a descarga efectuada livremente ou controlada por comportas. A condução do escoamento pode dar-se em canal, total ou parcialmente apoiado sobre a barragem, até um trampolim ou a uma estrutura de dissipação de energia, ou pode o escoamento atingir o leito no pé da barragem, sob a forma de jacto. A utilização de descarregadores com queda livre junto ao pé da barragem exige a presença de rocha de boa qualidade. É frequente a construção de uma bacia de dissipação de energia em betão a fim de assegurar a integridade do leito ao longo da vida da obra, bem como, em certos casos, a protecção das vertentes junto à barragem.



Foto 1– Barragem do Alto Ceira

Descarregador tipo soleira normal

Diz-se soleira normal, em relação a um determinado caudal, se o seu perfil é tal que se verifica a pressão atmosférica ao longo da soleira.



Foto 2– Barragem da Aguieira

Descarregador de orifícios

Os descarregadores de cheias por orifícios através de barragem (Foto 3) são aplicáveis em barragens de betão, de qualquer tipo, devendo ser, necessariamente controlados por comportas.

Os jactos provenientes dos orifícios podem atingir o leito próximo da barragem ou numa zona mais a jusante, sendo necessário precaver para que não se verifiquem erosões que possam pôr em causa não só a estabilidade como os anos de vida da barragem.

Se a carga hidráulica a montante é elevada e a geometria dos orifícios é compatível, não é necessário recorrer à protecção do leito devido à erosão, se esta ocorrer a uma distância que não ofereça perigo.



Foto 3– Barragem de Cahora Bassa

Fora do corpo da barragem - Descarregador em canal

Os descarregadores em canal são aplicáveis a barragens de qualquer tipo, independente da estrutura da mesma (Foto 4). As descargas podem ser livres ou controladas por comportas.



Foto 4– Barragem Malhada do Peres

Descarregador em túnel

Para minimizar os custos existe a vantagem em recorrer a mecanismos de dissipação de parte significativa da energia de escoamento ao longo do canal do descarregador. Assim recorre-se a descarregadores não convencionais. A utilização de descarregadores não revestidos (Foto 5) está condicionada pela qualidade de rocha de fundação pela frequência de funcionamento do descarregador com caudais elevados e do caudal específico de dimensionamento. Não existem em Portugal descarregadores não revestidos de dimensão apreciável



Foto 5–Barragem de Beliche

Descarregador em poço

Em barragens de aterro (Foto 6) recorre-se, por vezes, a descarregadores em poço, vertical ou inclinado, seguidos de galerias sob a barragem ou de um túnel numa das encostas adjacentes à barragem. Em geral este tipo de descarregadores por razões estruturais e de economia tem a vantagem de permitir o aproveitamento das condutas ou túneis, que, em primeira fase das obras, foram utilizados para o desvio provisório.



Foto 6–Barragem da Paradela

Descarregador lateral

Menos compacto que o descarregador de lâmina livre, e é formado por uma estrutura de controlo separada da barragem e por um longo canal ou túnel (Foto 7).



Foto 7–Barragem de Alqueva

2.2 OBRAS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

Com o objectivo de minimizar os efeitos das perturbações introduzidas no regime natural dum escoamento pela execução duma obra hidráulica, torna-se necessário em muitos casos que a restituição dos caudais temporariamente retidos ou desviados se faça em condições que se aproximem o mais possível das condições naturais. Para a satisfação deste princípio, as estruturas de dissipação de energia constituem pela sua função e dimensão um dos elementos fundamentais a ter em conta na concepção das obras anexas dos aproveitamentos hidráulicos, em particular das que se destinam ao controlo e regulação das cheias afluentes.

Assim sendo, o excesso de energia dos escoamentos requer, geralmente, que se prevejam obras onde ocorra a dissipação da energia, de modo que a turbulência gerada no processo de dissipação não provoque danos em obras anexas ou erosões inaceitáveis nos leitos a jusante.

Para a dissipação de energia do escoamento num curto desenvolvimento é necessário que ocorram escoamentos com elevada intensidade de turbulência, por vezes designados como *escoamentos macroturbulentos* devido à visível agitação da superfície livre (Pinheiro, 2006).

O ressalto hidráulico, que ocorre na transição do regime rápido para o regime lento, é um escoamento rapidamente variado, com elevada intensidade de turbulência e, conseqüentemente, com significativa dissipação de energia. Outros escoamentos macroturbulentos frequentemente utilizados como meio de dissipação de energia são os resultantes da formação de vórtices de eixo horizontal, da existência de macrorugosidades nos canais e da penetração de jactos em colchões de água ou do seu impacto em fronteiras sólidas ou, menos frequentemente, do seu cruzamento.

O processo clássico e ainda muito em uso de dominar a energia das descargas das cheias é a dissipação por ressalto hidráulico numa bacia convenientemente ancorada e drenada; deve ser projectada de modo a que a maior parte da energia se dissipe dentro da mesma, em todos os regimes de escoamento.

Outro processo também muito usado consiste na construção de defletores em salto ski. Neste caso a dissipação de energia pode fazer-se por atrito de água no ar, pelo choque da lâmina de água contra a água acumulada a jusante da barragem ou por erosão nos fundos e ainda pelo choque de duas lâminas de água, no caso de se terem estabelecido dois canais de eixos convergentes.

Os processos principais de dissipação de energia do escoamento, além do ressalto, podem dividir-se em:

- Processo de bacia de dissipação de impacto - Estruturas de pequenas dimensões desenvolvidas pelo Bureau of Reclamation. São particularmente vantajosas em descargas de fundo e em estruturas de drenagem
- Processo de dissipação por concha de rolo - O perfil longitudinal deste dissipador, em forma de concha (BUCKET) cria uma formação de um turbilhão de grande dimensão de eixo horizontal designado por rolo que promove a dissipação de energia do escoamento. (USBR ,1987)
- Bacia de dissipação com macrorrugosidades – A estrutura de dissipação mais frequentemente adoptada é a que corresponde à macrorrugosidade dos blocos. Utilizada em descarregadores em canal, o seu emprego está condicionado a pequenos caudais por unidade de largura e em regiões onde não se forma gelo e nem se prevê o arraste de corpos flutuantes pelo escoamento.

2.2.1 Concha de rolo

2.2.1.1 Características gerais

Quando o nível de água a jusante é substancialmente maior que o nível conjugado do ressalto que se formaria numa bacia de dissipação com o fundo sensivelmente à cota do leito, é aconselhável o emprego de estruturas de dissipação do tipo concha de rolo submerso.

O perfil longitudinal deste dissipador, em forma de concha, promove a formação de um turbilhão de grande dimensão, de eixo horizontal, designado por rolo, que promove a dissipação de energia do escoamento. De referir que, além do rolo que se forma sobre a concha, existe a jusante um rolo com rotação no sentido contrário. (Pinheiro, 2006).

As estruturas em concha de rolo podem ser de dois tipos:

- - Conchas de rolo sem blocos
- - Conchas de rolo com blocos

Numa concha de rolo sem blocos (Figura 1 e Figura 2), o escoamento à saída do lábio é completamente dirigido para cima, formando um colchão à superfície da água e dois rolos, situando-se um rolo sobre a concha e outro imediatamente a jusante, junto ao leito.

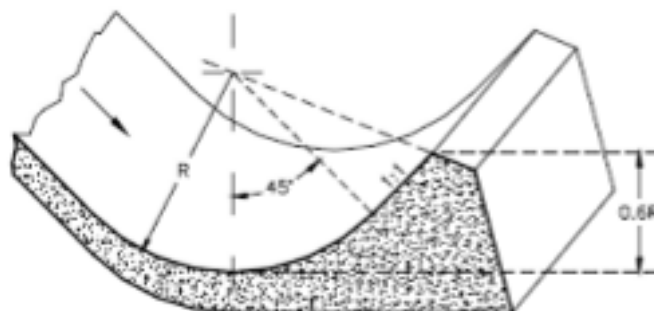


Figura 1–Caracterização geométrica de uma concha de rolo sem blocos (Pinheiro, 2006)

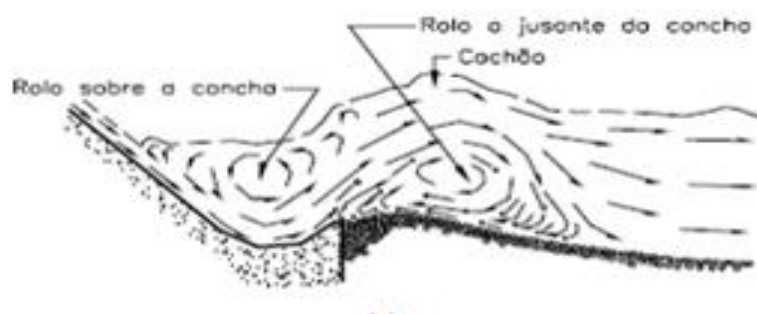


Figura 2 – Funcionamento hidráulico de uma concha de rolo sem blocos(Pinheiro, 2006)

Se não existirem blocos que fracturem a veia líquida, tornando o escoamento claramente tridimensional, toda a corrente é dirigida para o alto à saída do lábio da concha, criando um cachão na superfície da água e um rolo de jusante violento e junto ao fundo. A violência do cachão e do rolo de fundo dependem do nível a jusante, sendo mais significativa para níveis baixos. (Pinheiro, 2006).

O rolo de jusante desloca o material de fundo de jusante para montante e deposita-o junto do lábio, de onde é sucessivamente captado pela corrente, transportado para jusante e depositado, originando um movimento constante. A eventual entrada da água no dissipador em condições assimétricas devido por exemplo, à abertura de apenas algumas das comportas de um descarregador de cheias, provoca a penetração de material sólido na concha e na zona em que ocorre o menor caudal específico, o que tem o inconveniente de originar abrasão da superfície de betão da concha. (Pinheiro, 2006)

Se a concha dispõe de blocos (Figura 3 e Figura 4), parte da corrente passa sobre estes, sendo dispersada e ocorrendo, portanto, redução das dimensões do rolo de fundo a jusante da concha. A vantagem de concha de rolo com blocos é empurrar rapidamente para a jusante o material sólido que seja momentaneamente arrastado para dentro da concha, reduzindo-se assim, o risco potencial de abrasão. (Pinheiro, 2006)

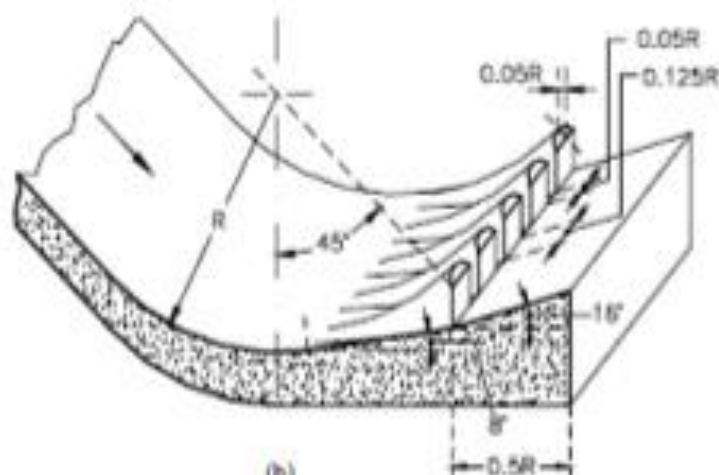


Figura 3– Caracterização geométrica de uma concha de rolo com blocos(Pinheiro, 2006)

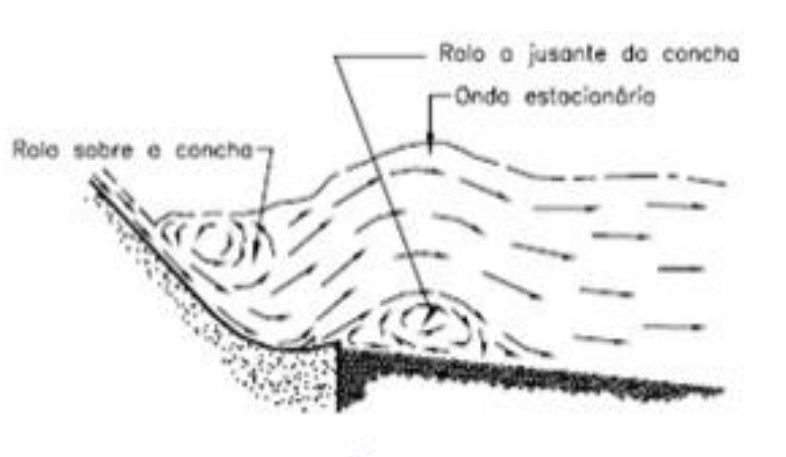


Figura 4 – Funcionamento hidráulico de uma concha de rolo com blocos(Pinheiro, 2006)

2.2.1.2 Influência do nível de jusante no funcionamento da concha de rolo

O esquema de escoamento em condições normais de funcionamento corresponde ao nível a jusante situado entre duas alturas limites, S_{max} e S_{min} (Figura 5a).

Para um nível suficientemente baixo, o rolo move-se para jusante da concha, funcionando a concha como trampolim (Figura 5b).

Para níveis acima do máximo, verifica-se inicialmente uma configuração em que a veia líquida mergulha a jusante do lábio, provocando erosão do fundo (Figura 5c;d).

Quando a erosão progride, forma-se um turbilhão e a veia deixa de ser mergulhante, repondo material sólido a jusante da concha. Durante o funcionamento, ocorre um ciclo em que as duas últimas configurações se alternam.

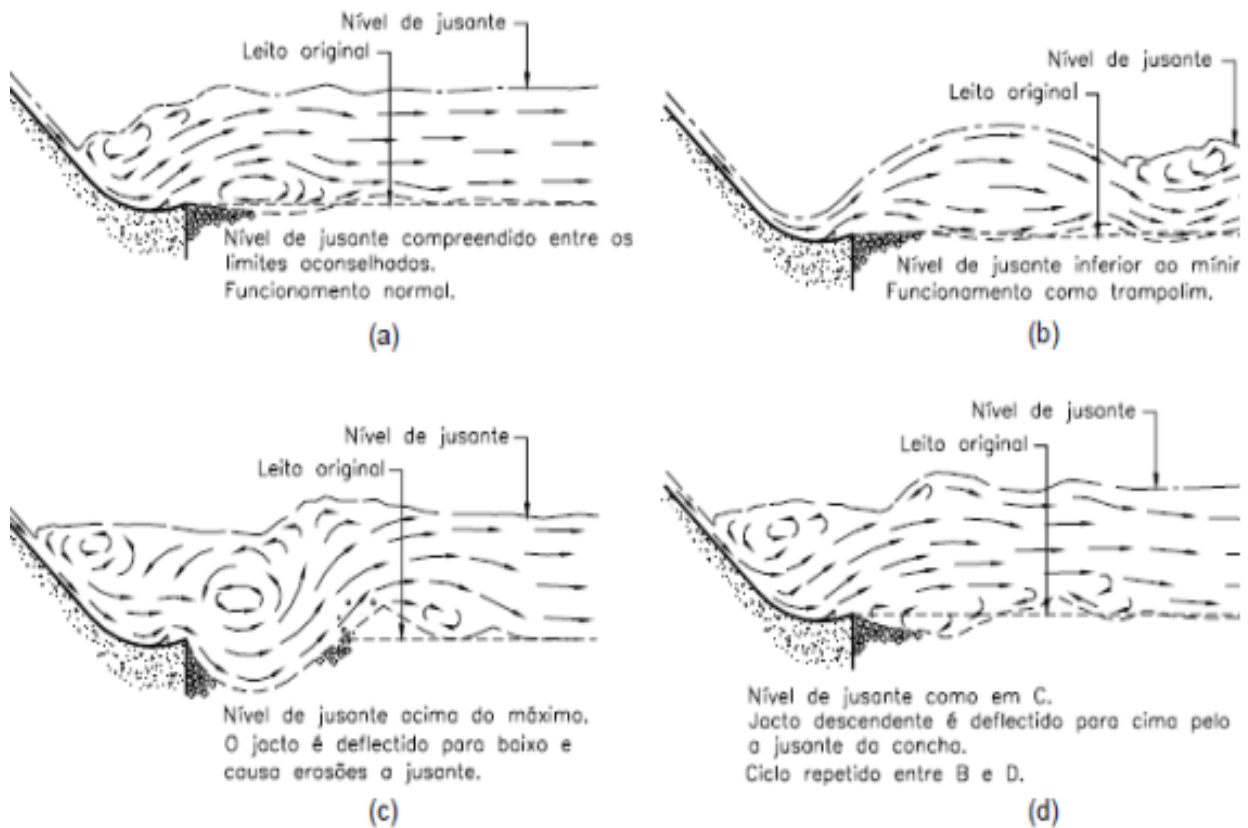


Figura 5– Influência do nível de jusante no funcionamento hidráulico das conchas de rolo (Pinheiro, 2006)

2.2.1.3 Dimensionamento da concha de rolo

USBR (1987) fornece indicações para o dimensionamento de conchas de rolo, com ou sem blocos, sendo dispensáveis ensaios hidráulicos desde que:

- não exista funcionamento prolongado com caudais próximos do de dimensionamento;
- caudais específicos inferiores a cerca de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$;
- velocidade à entrada inferior a 22 m/s;

As proporções de dissipadores em concha de rolo, sem e com blocos, com a definição pormenorizada dos blocos, estão indicadas na Figura 6.

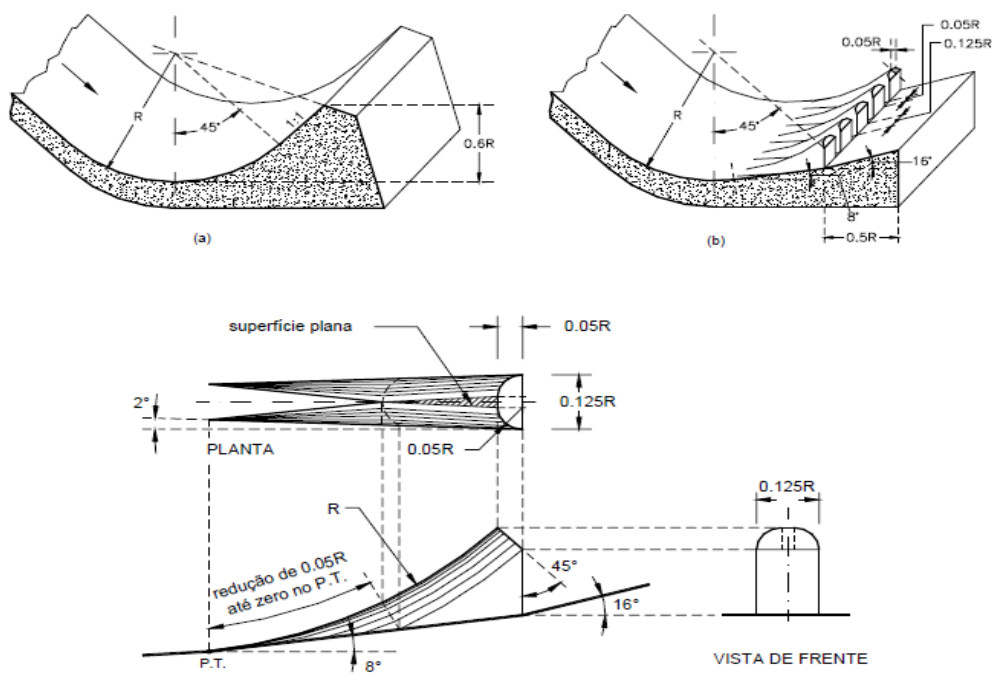


Figura 6 – Conchas de rolo (a) sem blocos, (b) com blocos

(Pinheiro, 2006)

O dimensionamento de dissipadores em concha de rolo tem como objectivo a determinação de :

- características geométricas da concha, das quais a mais significativa é o raio mínimo de curvatura; sendo as restantes características derivadas deste parâmetro de acordo com o exposto na Figura 6;
- cota da geratriz inferior da concha;

partindo do caudal de dimensionamento Q_1 , da altura do escoamento na concha h_1 e da velocidade média do escoamento correspondente, U_1 .

O procedimento para dimensionamento destes dois parâmetros é o seguinte:

- determina-se o raio mínimo da concha, R_{min} , a partir do número de Froude do escoamento Fr_1 , utilizando o ábaco superior da Figura 7.;
- estabelece-se a cota da geratriz inferior da concha de rolo de modo que a submersão desta geratriz, S , esteja contido entre S_{min} e S_{max} .

Nota(s) a submersão da geratriz S é o desnível entre a geratriz e o nível de escoamento não perturbado a jusante da concha. A submersão máxima (S_{max}) determina-se com o ábaco respectivo da Figura 7 partindo do número de Froude do escoamento Fr_1 e do parâmetro $R_{adop}/(h_1+U_1^2/2g)$. Em que R_{adop} é o valor do raio da concha adoptado ($R_{adop} > R_{min}$). A submersão máxima é a curva do ábaco que passa mais próximo do ponto de coordenada $(Fr_1, R_{adop}/(h_1+U_1^2/2g))$. Em relação á coordenada $R_{adop}/(h_1+U_1^2/2g)$ tem de se levar em conta a configuração do leito do rio imediatamente a jusante da concha.

A submersão mínima, S_{min} , determina-se com o ábaco respectivo da Figura 7 utilizando um procedimento análogo ao de submersão máxima. Neste caso é irrelevante a configuração do leito do rio imediatamente a jusante da concha.

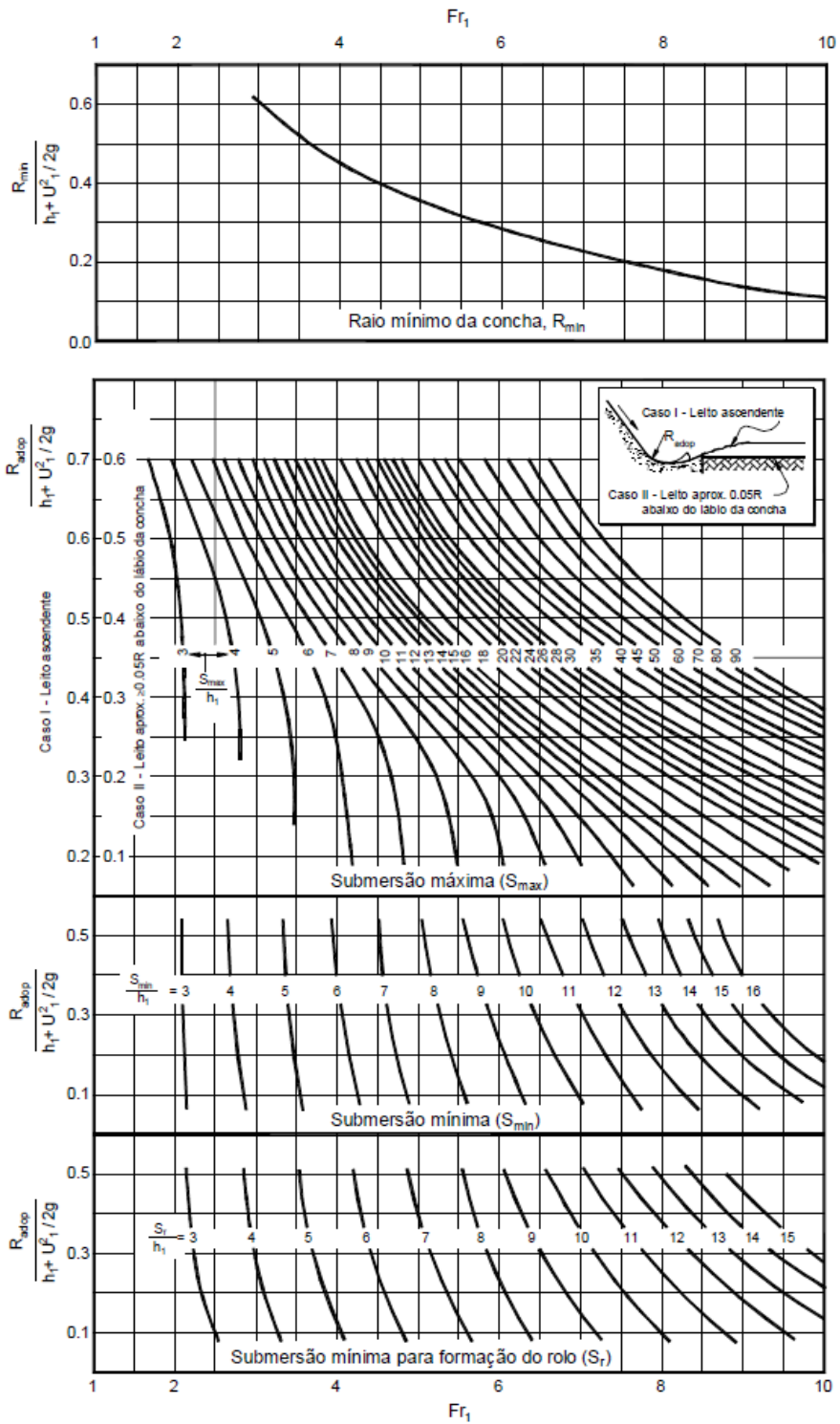


Figura 7—Conchas de rolo. Ábacos de dimensionamento (adaptado por Pinheiro 2006 de USBR, 1987)

3 DESCRIÇÃO DO MODELO REDUZIDO

3.1 BREVE DESCRIÇÃO DA BARRAGEM E RESPECTIVOS ÓRGÃOS HIDRÁULICOS

O modelo físico em estudo reproduz uma barragem de betão com perfil gravidade, com 75 m de altura acima da fundação e 262 m de desenvolvimento pelo coroamento. A albufeira possui um volume de 133 hm³ para o Nível de Pleno Armazenamento (NPA) à cota 110.

Os principais órgãos hidráulicos da barragem são o descarregador de cheias, a descarga de fundo, a torre de tomada de água e as galerias de adução e de restituição da central.

O descarregador de cheias, assente no corpo da barragem, é do tipo frontal, com três vãos de 13 m de largura cada munidos com comportas de segmento e terminando num trampolim. Em planta, os muros laterais do canal descarregador são convergentes, variando a largura total do canal entre 47,80 m na crista e 40,00 m na concha de rolo.

No dimensionamento do descarregador de cheias foi considerado um caudal de 2750 m³/s, correspondente à cheia com período de retorno de 1000 anos. Este caudal de projecto corresponde a um caudal específico de cerca de 69 m³s⁻¹m⁻¹, ou seja, superior ao recomendado pelo USBR(1987) para conchas de rolo. Nesta situação é usualmente recomendado o estudo da solução em modelo físico.

A central da barragem localiza-se na margem esquerda do rio. A restituição dos caudais ao rio é efectuada através de uma galeria curta.

3.2 ELEMENTOS DO MODELO E ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Para a realização do estudo foi construído um modelo reduzido (Figura 8 e Foto 8), não distorcido, à escala geométrica de 1/50. No modelo foram reproduzidas as estruturas do descarregador de cheias, e trechos do leito do rio e das encostas, a montante e a jusante da barragem.

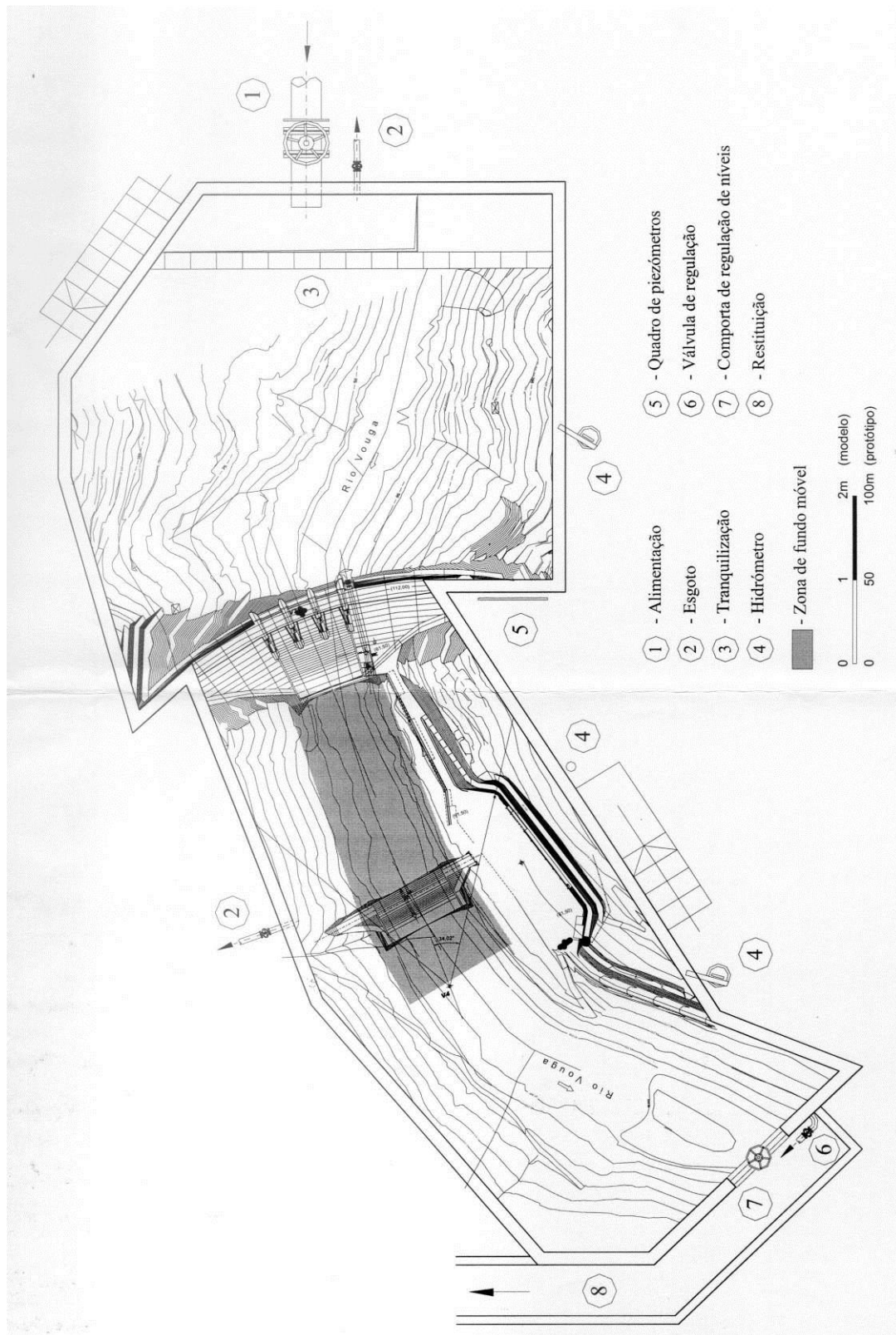


Figura 8 – Esquema geral do modelo

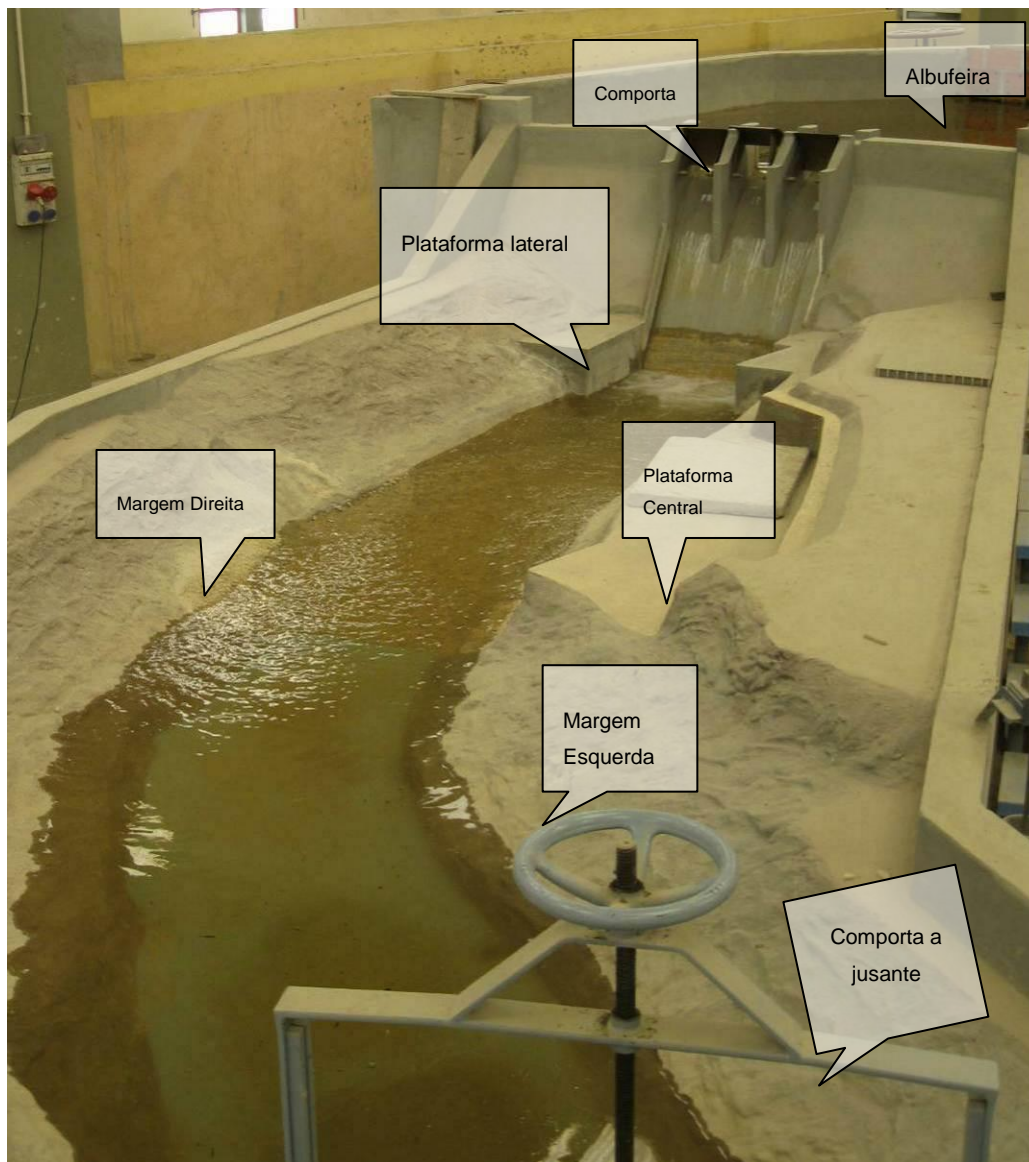


Foto 8–Vista geral do modelo reduzido e seus aspectos principais

O modelo reproduz um trecho de rio com o comprimento total correspondente a 655 m e uma largura média do vale correspondente a 190 m.

Tendo em consideração os objectivos do estudo, designadamente, a determinação das erosões resultantes do funcionamento do descarregador de cheias, foi implementado no modelo, imediatamente a jusante do descarregador de cheias, um trecho com fundo móvel com uma extensão correspondente a 165 m no protótipo, e com uma largura de cerca de 41 m.

O fundo móvel foi reproduzido no modelo com um cascalho caracterizado por um diâmetro mediano $D_{50} = 15,4 \text{ mm}$ e peso específico $24,5 \text{ kN/m}^3$. Este material corresponde no protótipo a blocos com diâmetros de cerca de 77 cm.

A alimentação de água ao modelo faz-se a partir da rede de abastecimento do pavilhão de ensaios através de uma tubagem com 500mm de diâmetro na qual se localiza uma válvula de regulação com o mesmo diâmetro e um medidor electromagnético de caudais. A entrada de água no modelo faz-se através de um sistema de tranquilização do escoamento conforme a Foto 9 (ver também Figura 8).



Foto 9—Elementos para a tranquilização do escoamento na entrada da albufeira

Os níveis de água no rio a jusante da barragem foram reproduzidos no modelo utilizando uma comporta vertical de regulação localizada na extremidade de jusante do modelo (Foto 10). A leitura do nível é feita no hidrómetro de ponta graduado conforme se explicará na secção 3.3, tendo-se considerado a curva de vazão numa secção do rio localizada no protótipo a cerca de 355m a jusante da crista da soleira descarregadora.

Os níveis de água na albufeira foram medidos numa secção localizada no protótipo a cerca de 120 m a montante da crista da soleira descarregadora. No presente caso os níveis de água na albufeira são controlados por comportas do tipo segmento (Foto 11) que, através da sua abertura parcial ou total, permite a passagem controlada da água sobre o descarregador.



Foto 10 – Comporta a jusante



Foto 11– Comportas de segmento do descarregador

O modelo reduzido foi construído de acordo com os procedimentos habituais no Núcleo de Recursos Hídricos e Estruturas Hidráulicas do LNEC, relativos aos

materiais e às técnicas de construção de modelos físicos deste tipo, designadamente:

- Na reprodução da topografia utilizou-se a técnica corrente de materialização das curvas de nível com varões de ferro de 6 mm de diâmetro sobre a quadrícula de referência previamente traçada na laje do pavilhão de ensaios, enchimento com areia e revestimento superficial com argamassa de cimento de forma a reproduzir a macrorrugosidade do vale do rio (Foto 12).
- As estruturas hidráulicas foram moldadas com argamassa de cimento e areia e as fronteiras do escoamento com um revestimento de pasta de cimento de forma aceitável a simular a rugosidade das superfícies de betão no protótipo, onde também se utiliza um betão com acabamento cuidado.



Foto 12–Fase de construção do modelo. Representação da topografia do terreno na zona da albufeira

As estruturas a estudar são moldadas em local próprio e colocadas depois no modelo como aconteceu no presente caso com o descarregador de cheias e a concha de rolo (Foto 13, Foto 14 e Foto 15).

Refira-se que estas estruturas são moldadas em argamassa de cimento nas partes onde se não prevêem modificações, e em gesso nas partes que se admite poderem ser alteradas. Quando for necessário efectuar medições de pressão, é preciso incorporar as respectivas tomadas durante a fase de moldagem.



Foto 13—Modelação da soleira do descarregador



Foto 14 – Soleira descarregadora



Foto 15 – Concha de rolo (base de fixação e dentes)

3.3 EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO E DE REGISTO

Neste estudo foram utilizados os seguintes equipamentos de medição:

- Caudalímetro para medição de caudais;
- Hidrómetros para medição dos níveis de água;
- Piezómetros para medição das pressões.

O caudalímetro é um medidor de caudal que se utiliza para medição, controle e regulação de fluidos electricamente condutivos em condutas fechadas especialmente nos sectores de tratamento e distribuição de águas, alimentação, químico e energia.

No referido estudo do modelo reduzido em foi utilizado um caudalímetro electromagnético “Modelo Alfometer” constituído por um elemento primário e por um elemento secundário.

Elemento primário - é um medidor electromagnético que utiliza o princípio físico de um condutor que passa por um campo magnético (que é fornecido pelas bobinas montadas ao redor da tubagem), desenvolve uma tensão eléctrica nos seus terminais dos eléctrodos que é proporcional ao caudal que atravessa o tubo, Foto 16.

Elemento secundário - transmissor (conversor) de um caudal converte a tensão eléctrica proveniente dos eléctrodos num sinal normalizado (por exemplo 4 – 20 mA), que é enviado por sistema de aquisição de dados ou para o controlador conforme a Foto 16. É de salientar que o exemplo (4 - 20mA) significa que o caudalímetro está programado de uma gama de valores 4 a 20 mA , em que 4 mA corresponde a inexistência de caudal e 20 mA ao valor de caudal máximo a ser utilizado. O erro de medição global é inferior a 0,5%.

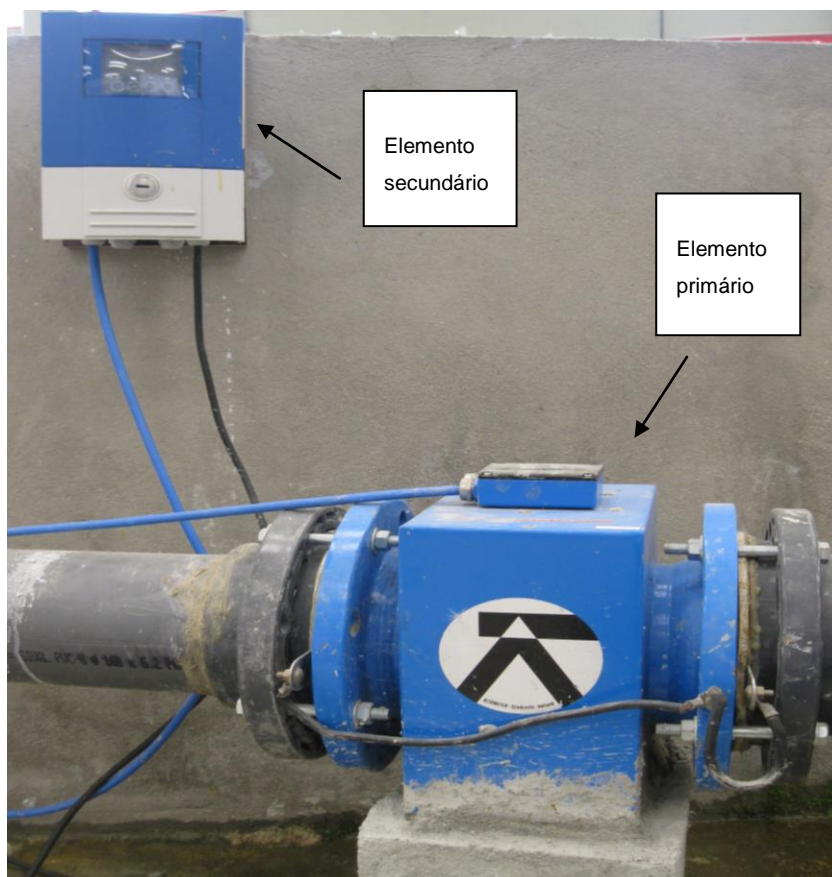


Foto 16–Elemento primário e secundário do caudalímetro

A medição de níveis de água foi realizada através de hidrómetro de ponta graduados (Foto 17 e Foto 18) em milímetros, com nónio, instalados em poços de estagnação transparentes. Com um aparelho em boas condições e leituras cuidadas o erro pode estimar-se inferior a 0,2 mm, ou mesmo a 0,1 mm. A leitura deve fazer-se descendo a escala até que a ponta do hidrómetro contacte o líquido.



Foto 17 – Hidrómetro de ponta graduado

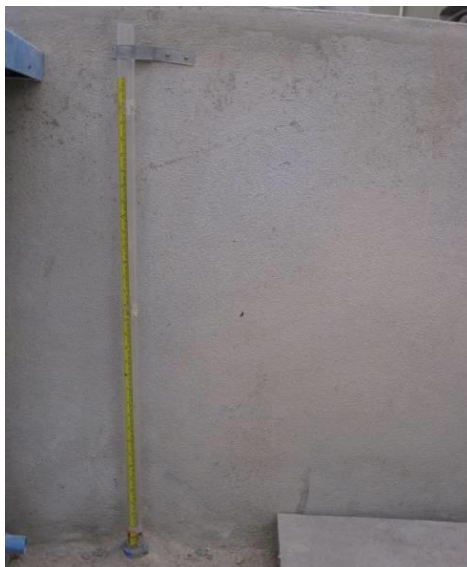


Foto 18– Tubo graduado para medição de alturas de água

A medição das pressões foi realizada através de piezómetros (Foto 19). Um piezómetro é um tubo ligado pela sua parte inferior ao recipiente que contém o líquido, e que abre livremente na atmosfera pela sua parte superior. O nível no piezómetro dá directamente a posição da linha piezométrica, isto é, a cota correspondente ao termo $z + \frac{p}{\gamma}$.

Sendo:

Z - cota geométrica,

γ - peso específico,

p - pressão num dado ponto

$\frac{p}{\gamma}$ - altura piezométrica.



Foto 19 – Quadro de pressão

Para evitar o efeito da capilaridade, um piezómetro em que o líquido seja água não deve ter um diâmetro inferior a 5 mm.

A medição das pressões médias ao longo da fronteira do escoamento é fundamental na análise da eventual ocorrência de cavitação associada às pressões muito baixas no seio do líquido.

Os líquidos vaporizam-se, libertando bolhas misturadas com gases primitivamente dissolvidos, nas zonas onde a pressão desce (ainda que episodicamente) abaixo da tensão de vapor do líquido à temperatura de momento $0,024\text{kg/cm}^2$ (ou $1/41$ de atmosfera) na água a $+20^\circ$. As bolhas retomam bruscamente a forma líquida inicial quando regressam a zonas de pressões mais elevadas. Daí variações brutais de volume do líquido, que provocam pequenos choques cuja repetição constante provocam vibrações que acabam por deteriorar as paredes ou móveis do sistema. A esse fenómeno destruidor dá-se o nome de cavitação (Larras,1979).

Sendo o betão um material com baixa resistência à cavitação, para a evitar haverá que limitar as pressões negativas e dar aos paramentos onde elas se instalam e as zonas envolventes acabamento cuidado, evitando as irregularidades da superfície. Como ordem de grandeza, as depressões locais médias não deverão exceder os 6 m (coluna de água) para se ter uma certa segurança em relação às flutuações em torno do valor médio. (Lemos,1975).

3.4 RELAÇÕES DE SEMELHANÇA

O modelo físico foi explorado de acordo com a lei de Froude, dado serem as forças de inércia e de gravidade as dominantes nos fenómenos que interessam caracterizar. Com base nesta lei e tendo em consideração a escala do modelo, as relações entre os valores das diferentes grandezas medidas no modelo e no protótipo (escalas) são as seguintes:

a) escala linear: $L_p/L_m = L = 50$

b) escala de velocidades: $V_p/V_m = L^{1/2} = 7,071$

c) escala de pressões: $p_p/p_m = L = 50$

d) escala de caudais: $Q_p/Q_m = L^{5/2} = 17677,670$

e) escala de tempos: $t_p/t_m = L^{1/2} = 7,071$

onde os índices p e m se referem, respectivamente, às grandezas no protótipo e no modelo.

3.5 EFEITOS DE ESCALA

Os efeitos de escala resultam, nos modelos de Froude, (em que se procura manter no modelo a relação entre as forças de inércia e as forças de gravidade existente no protótipo), de os números de Reynolds (relação das forças de inércia com forças de viscosidade) e número de Weber (relação das forças de inércia com forças capilares) serem muito menores no modelo do que no protótipo (e que, portanto os efeitos da viscosidade e da tensão superficial são relativamente maiores naquele do que neste).

A prática laboratorial evidencia que, se forem assegurados no modelo, para os caudais significativos, números de Reynolds superiores a um dado limite (o valor 10000 para esse limite) e dimensões das secções transversais do escoamento não muito pequenas (valores mínimos usuais 10 cm para uma largura ou diâmetro e 2cm para uma profundidade de escoamento), os efeitos de escala propriamente ditos, aí incluindo o facto de o desenvolvimento da camada-limite no modelo não ser semelhante a esse desenvolvimento no protótipo, são pouco relevantes. (O'Loughlin et al, 1970).

Estes condicionamentos são respeitados no presente modelo, dada a sua relativamente grande escala geométrica. Contudo, continuar-se-á a verificar um ligeiro efeito de escala, favorável à segurança das conclusões, no que diz respeito a capacidade de vazão do descarregador. Como esse efeito de escala é reduzido, de quantificação precária e do lado da segurança não é usual tomá-lo em conta.

As fronteiras do escoamento são necessariamente diferentes em modelo e protótipo devido a necessidade da escolha de um limite de jusante, um dispositivo (em regra uma comporta) para o controlo de níveis e sem afectar as características do escoamento. Daí resultam também efeitos de escala. A experiência laboratorial tem indicado ordens de grandeza das distâncias entre os limites de montante e jusante do modelo e as estruturas hidráulicas respectivamente mais a montante e a jusante para que não sejam afectadas as características dos escoamentos na zona do

ensaio. No caso presente o tanque de alimentação é de grandes dimensões relativamente às dimensões do descarregador e reproduz bem as condições de alimentação simétrica que ocorrem no protótipo. A extensão do modelo a jusante da barragem é de 4,60 m.

Quanto ao leito do rio em estudo implantou-se uma estrutura no modelo que assegura a semelhança de rugosidade com o protótipo. Nos estudos de estruturas hidráulicas o trecho do rio a reproduzir costuma ser relativamente curto e fenómenos hidráulicos localizados são os que determinam essencialmente a configuração geral do escoamento, o qual, neste caso só depende das condições de montante (escoamento rápido).

Quanto à rugosidade das superfícies molhadas do descarregador de cheias do modelo, verifica-se, que apesar dos acabamentos construtivos cuidadosos e da semelhança geométrica geral com o protótipo, não é possível assegurar semelhança de perdas de carga contínuas, mesmo quando no protótipo se utiliza um betão também com acabamento cuidado.

3.6 EXPLORAÇÃO DO MODELO E REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

Um modelo só estará pronto a ser utilizado depois de devidamente tarado. A taragem consiste nas operações que permitem garantir um escoamento no modelo semelhante ao do protótipo. Nos estudos de estruturas hidráulicas a taragem efectua-se, assegurando, que numa dada secção do curso de água as curvas de vazão são semelhantes no modelo e no protótipo. Nesta operação, é necessário fazer corresponder o zero dos hidrómetros e quadros de pressão às cotas do protótipo o que é feito através da transposição de cotas utilizando geralmente como referência no modelo pontos bem conhecidos tais como a cota da crista da soleira, cotas do fundo da bacia etc.

A exploração do modelo compreende, geralmente, três fases:

1. Observação do comportamento hidráulico do curso de água ou das estruturas projectadas antes de qualquer modificação.

2. Estudo das obras ou de modificações das mesmas com o objectivo de maximizar a sua funcionalidade e de não encarecer a obra.
3. Verificações que só tenham sentido efectuem-se em relação às estruturas definitivas.

Qualquer destas fases pode compreender, para diversas modalidades de funcionamento hidráulico:

- Observação visual das condições de escoamento;
- Registos fotográficos das situações mais relevantes;
- Medições diversas (caudais, níveis, velocidades, pressões, etc.).

Atendendo a que o objectivo do estudo é a análise do funcionamento hidráulico de duas conchas de rolo de forma a garantir uma adequada dissipação de energia do escoamento a jusante do descarregador, com reduzidos efeitos no leito, preconizou-se um conjunto de ensaios no modelo reduzido. Estes ensaios consistiram na verificação das condições de escoamento para diferentes caudais e no levantamento das erosões do leito.

O procedimento na condução dos ensaios consistiu em introduzir a água na albufeira do modelo de forma lenta. Nesta fase inicial, o nível de água a jusante do descarregador é mantido num valor alto para que o escoamento não perturbe o fundo móvel. Após estabelecido o caudal de ensaio, verificado através da leitura no caudalímetro, a posição da comporta de jusante era definida com base na curva de vazão de jusante. Simultaneamente, estabelecia-se a abertura parcial (ou total) das comportas do descarregador de forma a assegurar o nível constante na albufeira igual ao Nível de Pleno Armazenamento (NPA). Importa referir que, no início de cada ensaio, o fundo móvel correspondia ao fundo previsto no projecto.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS

4.1 ENSAIOS REALIZADOS

Como foi referido no Capítulo 1, o objectivo do presente estudo é a análise do funcionamento hidráulico de dois tipos de conchas de rolo na dissipação de energia do escoamento. Neste âmbito foram realizados os seguintes conjuntos de ensaios:

- Ensaios das condições de escoamento na soleira descarregadora;
- Ensaios do funcionamento da concha de rolo, considerando diferentes geometrias e a existência ou não de blocos.

4.2 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO NA SOLEIRA DO DESCARREGADOR

Foram realizados ensaios para caudais crescentes correspondentes no protótipo a $500 \text{ m}^3/\text{s}$, $1000 \text{ m}^3/\text{s}$, $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ e $2750 \text{ m}^3/\text{s}$. Para esta gama de caudais verificou-se que as condições de aproximação do escoamento à soleira descarregadora são adequadas, não existindo contracções significativas junto aos pilares do descarregador.

De acordo com o projecto da barragem as comportas funcionarão completamente abertas para caudais afluentes muito elevados. Nas situações de caudais com baixos períodos de retorno, proceder-se-á à abertura das comportas de modo gradual para que o caudal descarregado seja aproximadamente igual ao afluente.

A curva de vazão do descarregador, para abertura total das comportas, encontra-se representada na Figura 9, para uma gama de caudais que se estende de $53 \text{ m}^3/\text{s}$ a $2953 \text{ m}^3/\text{s}$. Na mesma figura, incluiu-se ainda a curva estimada no projecto. Verifica-se que a capacidade de vazão do descarregador se aproxima da prevista no projecto, principalmente para os caudais mais elevados.

Os valores medidos no modelo e que deram origem à curva de vazão são apresentados no Quadro 1.

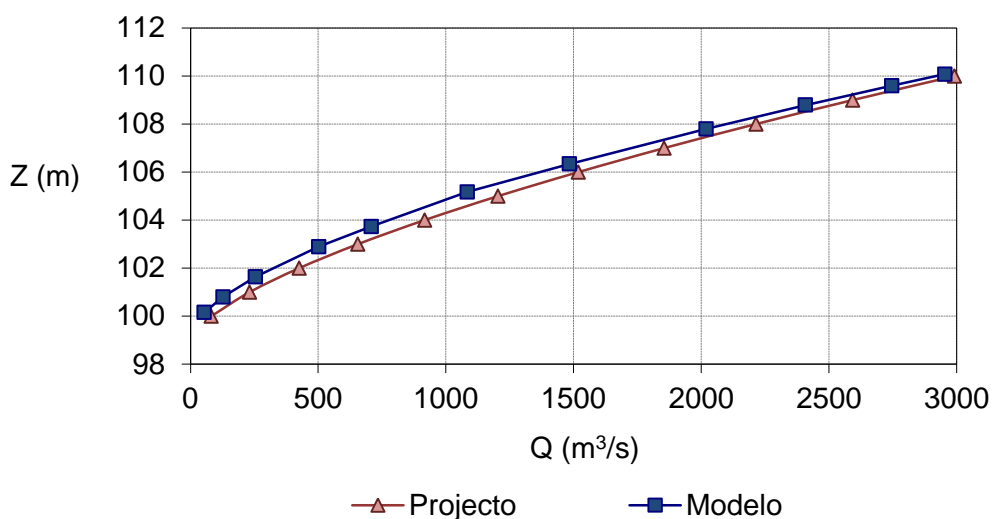


Figura 9 – Curva de vazão. Abertura total das comportas

Quadro 1 – Valores da curva de vazão do descarregador

Q- Caudal (m³/s)	Z - Nível na albufeira (m)
53,3	100,15
127,3	100,80
254,7	101,64
502,1	102,89
707,9	103,73
1083,6	105,17
1483,6	106,34
2019,0	107,80
2407,8	108,79
2746,5	109,60
2953,7	110,08

Para verificar a capacidade de vazão do descarregador, no caso da abertura parcial das comportas, considerou-se a operação simultânea e aberturas parciais idênticas das três comportas. Com base nos elementos do projecto, definiram-se as seguintes aberturas: 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m e 6 m. Foram realizados ensaios no modelo que tiveram por objectivo determinar, para cada abertura parcial citada, o caudal que

garante o Nível de Pleno Armazenamento (NPA) na albufeira, permitindo assim que a central hidroelétrica funcione em pleno. A curva de vazão com aberturas parciais é apresentada na Figura 10.

Refira-se que nas situações reais de exploração de albufeiras nem sempre é possível garantir o NPA, nomeadamente, em situações de secas em que as afluências são reduzidas, e em situações de cheias, em que pode ser necessário reduzir o nível na albufeira para permitir o encaixe da cheia. A central hidroelétrica só funcionará quando o nível na albufeira é superior ao Nível Mínimo de Exploração (NM).

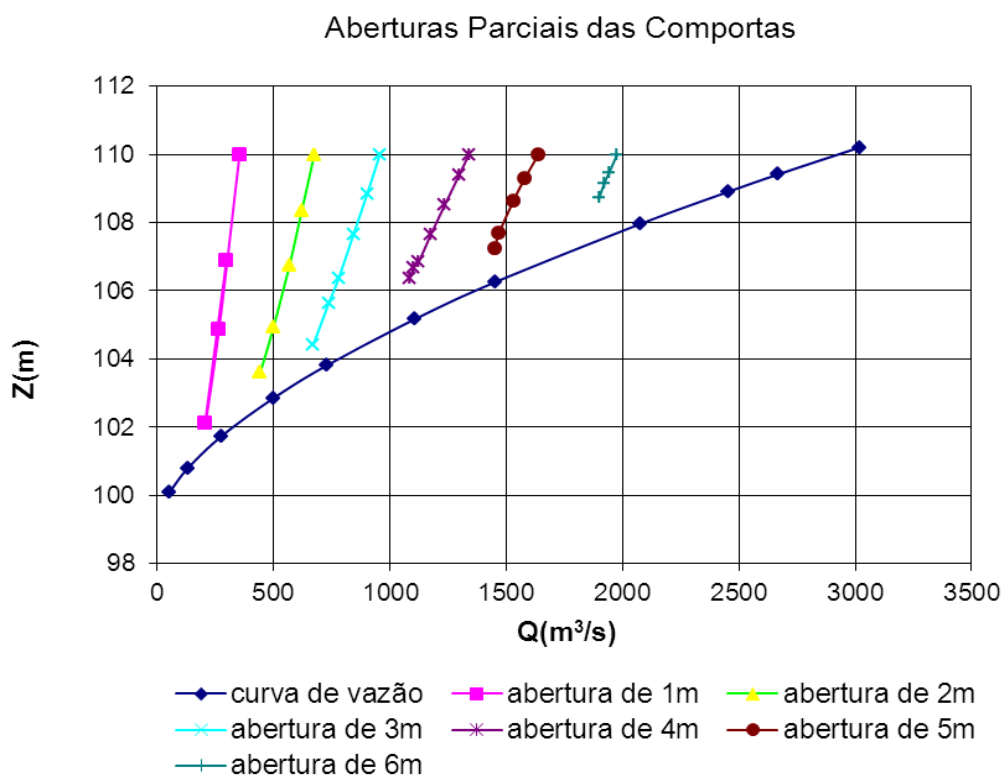


Figura 10 – Curva de vazão do descarregador. Aberturas parciais das comportas

4.3 ANÁLISE DA SOLUÇÃO CONCHA DE ROLO

4.3.1 Considerações gerais

Tendo como objectivo garantir uma adequada dissipação de energia e boas condições de restituição dos caudais descarregados ao leito do rio foram ensaiadas diferentes soluções de concha de rolo considerando diferentes geometrias da concha (raio) e a existência, ou não, de blocos (número, dimensões e espaçamento entre os dentes). As diferentes soluções são identificadas no Quadro 2. As soluções A e B correspondem a uma concha de rolo com 10 m de raio, sem e com dentes (blocos), respectivamente. As soluções C, D e E correspondem a conchas de rolo com 14 m de raio, com dentes de diferentes dimensões e espaçamentos entre si.

Quadro 2 – Geometrias de concha de rolo

Solução	Raio da concha derolo (m)	dentes			
		Número	Altura	largura	espaçamento
A	r =10m	-	-	-	-
B	r =10m	18	2.0m	1.25m	1m
C	r =14m	18	2.75m	1.25m	1m
D	r =14m	14	2.75m	1.88 m	1m
E	r =14m	11	2.75m	2.50m	1m

O raio da concha de rolo, sem dentes, foi obtido considerando os ábacos de dimensionamento apresentados em 2.2.1. Para a aplicação dos ábacos é necessário o caudal de projecto ($Q=2750 \text{ m}^3/\text{s}$), a largura do descarregador ($L=40,0 \text{ m}$) e a altura de escoamento à entrada da concha de rolo que, neste caso, foi obtida no modelo ($h=3,3 \text{ m}$). Com base nestes valores determinou-se o número de Froude e, por aplicação do ábaco de dimensionamento da Figura 7, o raio mínimo da concha de rolo. O número de Froude é obtido através dos seguintes cálculos:

$$A = L \times h = 40 \times 3,3 = 132\text{m}^2$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{2750}{132} = 20,8 \text{ m/s}$$

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} = \frac{20,8}{\sqrt{9,8 \times 3,3}} = 3,66$$

sendo V a velocidade de escoamento, Q o caudal de projecto, A a área da secção transversal do escoamento, L a largura do descarregador, h a altura de água do escoamento e g a aceleração de gravidade.

Através da Figura 7, obteve-se $\frac{R_{min}}{h+V^2/2g} = 0,52$, a que corresponde um raio mínimo

da concha de rolo igual a $R_{min} = 13,2 \cong 14m$.

Para o dimensionamento dos dentes da concha de rolo foi utilizada a Figura 3, onde é recomendado, em função do raio da concha de rolo, a localização dos dentes, o seu espaçamento e largura, e a geometria do lábio da concha.

Atendendo a que a construção da concha de rolo implica volumes de escavação do terreno não desprezáveis, o que agrava os custos da obra, foi testada a possibilidade de utilizar uma concha de rolo com raio inferior, que implica menos escavação, tendo-se optado por uma solução com 10 m de raio.

Para cada uma das soluções foi realizado um conjunto de ensaios no modelo reduzido com os caudais de 500 m³/s, 1000 m³/s, 2000 m³/s e 2750m³/s. Nestes ensaios foram observados os seguintes aspectos:

- Erosões do leito do rio e na base das encostas;
- Condições de escoamento na zona da restituição da central;
- Eventuais galgamentos da plataforma da central e das plataformas laterais da concha de rolo.

A avaliação das erosões a jusante, resultante do funcionamento da concha de rolo, é baseada na materialização das curvas de nível ou da zona de fundo móvel do modelo e recorrendo depois a fotografia. A técnica mais usual consiste em

reproduzir as curvas de nível com o fio de lã de cor que contrasta com o fundo, o que se consegue ajustando sucessivamente o plano de água a cotas certas, equidistantes e cada vez menores e dispondo os fios segundo a linha de contacto da água com o terreno. Os fios de lã são devidamente referenciados e depois fotografados.

4.3.2 Solução A

A solução A consiste numa concha de rolo com 10 m de raio sem dentes.

Realizaram-se ensaios com caudais 500 m³/s, 1000 m³/s, 2000 m³/s e 2750 m³/s, observando-se as condições de escoamento na concha de rolo e o efeito erosivo no leito.

- **Caudal de 500 m³/s**

Para o caudal de 500 m³/s o funcionamento da concha de rolo parece adequado, constatando-se a inexistência de erosões tanto no leito do rio como nas margens (Foto 20).



Foto 20 – Solução A. Escoamento do caudal 500 m³/s

- **Caudal de 1000 m³/s**

No ensaio com o caudal 1000 m³/s (Foto 21 e Foto 22) observaram-se os seguintes aspectos:

- Oscilação do rolo na concha;
- Inundação ocasional das plataformas laterais da concha de rolo;
- Não se verifica a inundação da plataforma da central.



Foto 21 – Solução A. Escoamento do caudal 1000 m³/s



Foto 22 – Solução A. Erosão do leito para o caudal 1000 m³/s

- **Caudal de 2000 m³/s**

No ensaio com o caudal de 2000 m³/s (Foto 23 e Foto 24) verificaram-se os seguintes aspectos:

- Oscilação do rolo na concha;
- Inundação das plataformas laterais da concha de rolo;
- Projecção do escoamento com oscilação dos níveis de água a jusante;
- Inundação da plataforma da central.



Foto 23 – Solução A. Escoamento do caudal 2000 m³/s



Foto 24–Solução A. Erosão do leito para o caudal 2000 m³/s

Atendendo aos resultados obtidos considera-se que o funcionamento da concha não é satisfatório.

- **Caudal de 2750 m³/s**

Para o caudal de projecto, as condições de escoamento na concha de rolo não se mostraram adequadas devido aos seguintes problemas (Foto 25 e Foto 26).

- Oscilação do rolo de concha;
- Inundação das plataformas laterais da concha de rolo;
- Projecção do escoamento com oscilação dos níveis de água a jusante;
- Inundação da plataforma da central.
- Erosões acentuadas no leito a jusante



Foto 25 – Solução A. Escoamento do caudal 2750m³/s



Foto 26–Solução A. Erosão do leito para o caudal 2750 m³/s

4.3.3 Solução B

Atendendo à ocorrência de oscilação do rolo no interior da concha, considerou-se uma concha de rolo com dimensões idênticas às da Solução A, com dentes. A dimensão e o espaçamento dos dentes foram definidos tendo em conta as recomendações apresentadas na Figura 6, tendo-se obtido dentes com altura de 2,0 m, largura de 1,25 m e espaçamento de 1 m.

- **Caudal de 500 m³/s**

Para o caudal de 500 m³/s o funcionamento da concha de rolo parece adequado, não ocorrendo erosões do leito do rio ou das margens (Foto 27 e Foto 28).



Foto 27 – Solução B. Escoamento do caudal $500 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 28–Solução B. Erosão do leito para o caudal $500 \text{ m}^3/\text{s}$

- **Caudais de 1000 m³/s e 1500 m³/s**

Nos ensaios realizados com os caudais de 1000 m³/s (Foto 29e Foto 30) e de 1500 m³/s (Foto 31 e Foto 32) observou-se que os escoamentos se processam de forma tranquila, deixando de verificar-se a inundação das plataformas laterais da concha de rolo como acontecia na Solução A.



Foto 29–Solução B. Escoamento do caudal 1000 m³/s



Foto 30–Solução B. Erosão do leito para o caudal 1000 m³/s



Foto 31 – Solução B. Escoamento do caudal 1500 m³/s



Foto 32–Solução B. Erosão do leito para o caudal 1500 m³/s

- **Caudal de 2750 m³/s**

No caso do caudal de 2750 m³/s (Foto 33 e 34) continua a observar-se os seguintes aspectos:

- Inundações das plataformas laterais da concha de rolo;
- Galgamento da plataforma de central.



Foto 33–Solução B. Escoamento do caudal 2750 m³/s



Foto 34– Solução B. Erosão do leito para o caudal 2750 m³/s

4.3.4 Solução C

De forma a melhorar o funcionamento da solução em concha de rolo, para a gama de caudais ensaiados e, em particular, para o caudal de projecto, optou-se por alterar a geometria da concha de rolo, nomeadamente o seu raio, que passou para 14 m, e as dimensões dos dentes que passaram a: altura 2,75 m, largura 1,25m e espaçamento de 1m.

- **Caudal de 500 m³/s**

Para o caudal de 500 m³/s (Foto 35 e Foto 36), o escoamento processa-se de forma adequada, não se verificando a inundação das plataformas laterais da concha, nem o galgamento da plataforma da central.



Foto 35–Solução C. Escoamento do caudal 500 m³/s

Os efeitos erosivos no talvegue do rio e na margem esquerda são iguais. Sendo a maior incidência erosiva na margem direita a uma profundidade de 3 m do leito escavado e a uma distância de 5 m da concha do rolo.



Foto 36–Solução C. Erosão do leito para o caudal 500 m³/s

- **Caudal de 1000 m³/s**

O funcionamento da concha de rolo para o caudal de 1000 m³/s é, genericamente, semelhante ao observado para o caudal de 500 m³/s (Foto 37 e Foto 38).



Foto 37–SoluçãoC.Escoamento do caudal 1000 m³/s



Foto 38 – Solução C. Erosão do leito para o caudal 1000 m³/s

Das soluções ensaiadas referentes ao caudal $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ verificou-se de que a Solução C é a mais desfavorável com as erosões nas margens esquerda e direita idênticas de 7 m de profundidade a uma distância de 12 m de concha de rolo e uma deposição de material de 7 m de altura do leito escavado (leito de projecto) e a uma distância de 75m da concha de rolo.

- **Caudal de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$**

No ensaio com o caudal de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Foto 39 e Foto 40), o escoamento processa-se de forma tranquila, não se verifica a inundação das plataformas laterais da concha nem o galgamento da plataforma da central.

É de salientar que o efeito erosivo é maior na margem direita, com uma profundidade de 7 m a uma distância de 12 m da concha de rolo e com uma deposição de 6 m de altura do leito escavado.



Foto 39 – Solução C. Escoamento do caudal de $2000 \text{ m}^3/\text{s}$



Foto 40 – Solução C. Erosão do leito para o caudal de 2000 m³/s

- **Caudal de 2750 m³/s**

No caso da Solução C e caudal de 2750 m³/s verificou-se nos ensaios que o escoamento processa-se de forma adequada. Não se verifica a inundação das plataformas laterais da concha e não se observa o galgamento da plataforma da central (Foto 41 e Foto 42).



Foto 41 – Solução C. Escoamento do caudal 2750 m³/s



Foto 42 – Solução C. Erosão do leito para o caudal 2750 m³/s

A erosão do leito na margem esquerda e na margem direita são idênticas com uma profundidade de 8 m e uma distância de 17 m da concha de rolo. Dá-se uma deposição de 10 m de altura a uma distância de 100 m da concha de rolo(Foto 42).

4.3.5 Solução D

Na Solução D, as características da concha de rolo são semelhantes às da Solução C, com exceção da largura dos dentes, que é maior (1,80 m). Para esta solução foram ensaiados caudais crescentes entre 500m³/s e 2750 m³/s.

- **Caudal de 500 m³/s**

À semelhança do que se verificou nas soluções anteriores, para o caudal de 500 m³/s (Foto 43 e Foto 44) o escoamento processa-se de forma tranquila, não se verifica a inundação das plataformas laterais da concha nem o galgamento da plataforma da central.



Foto 43 – Solução D. Escoamento do caudal de 500 m³/s



Foto 44 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 500 m³/s

- **Caudal de 1000 m³/s**

Para o caudal de 1000 m³/s (Foto 45 e Foto 46), as conclusões sobre o funcionamento da concha de rolo são semelhantes às obtidas para o caudal anterior.



Foto 45 – Solução D. Escoamento do caudal 1000 m³/s

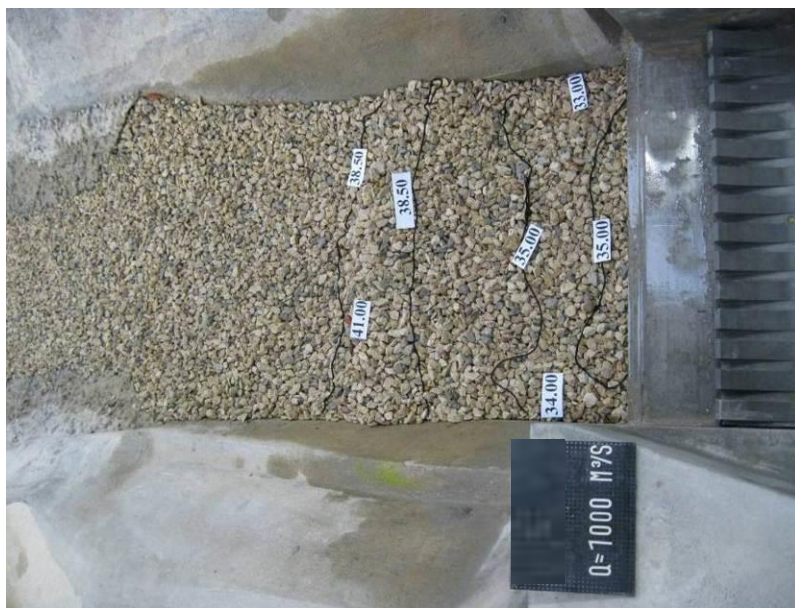


Foto 46 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 1000 m³/s

É de salientar o efeito erosivo no leito na margem esquerda, a uma profundidade de 4 m e a uma distância de 10 m da concha de rolo e uma deposição de 4 m de altura do leito escavado.

- **Caudal de 2000 m³/s**

No ensaio com o caudal de 2000 m³/s (Foto 47 e Foto 48), observou-se que o escoamento processa-se de forma tranquila, não se verifica a inundação das plataformas laterais da concha, e não se observa o galgamento da plataforma da central.



Foto 47 – Solução D. Escoamento do caudal 2000 m³/s



Foto 48 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 2000 m³/s

Os efeitos erosivos com maior evidência ocorrem na margem direita com 7 m de profundidade a uma distância de 12 m e uma deposição de 6 m de altura a 60 m da concha de rolo.

- **Caudal de 2750 m³/s**

No caso do caudal de 2750 m³/s (Foto 49 e Foto 50), mantêm-se as observações efectuadas para os caudais anteriores.



Foto 49 – Solução D. Escoamento do caudal 2750 m³/s



Foto 50 – Solução D. Erosão do leito para o caudal 2750 m³/s

A erosão com maior profundidade verifica-se na margem direita com 7 m de profundidade a uma distância de 12 m da concha de rolo e uma deposição de 6 m de altura a uma distância de 100 m da concha (Foto 50).

4.3.6 Solução E

A Solução E corresponde a uma concha de rolo com as seguintes características: raio de 14 m, 11 dentes com 2,75 m de altura, largura de 2,5 m e espaçamento entre os dentes de 1m. Para caracterizar a Solução E realizaram-se ensaios com os mesmos caudais das soluções anteriores, mas apenas se apresentam fotos para os caudais de 2000 m³/s e 2750 m³/s por serem as situações mais relevantes.

- **Caudal de 2000 m³/s**

No ensaio com o caudal 2000 m³/s (Foto 51 e Foto 52), verificou-se que a Solução E provoca erosões no leito junto à margens com maior intensidade do que as soluções anteriores. A maior incidência é na margem esquerda, com uma escavação de 9 m

de profundidade a uma distância de 6 m do lábio da concha de rolo e uma deposição de 6 m de altura a uma distância de 60 m do lábio da concha de rolo.



Foto 51- Solução E. Escoamento do caudal 2000 m³/s



Foto 52 – Solução E. Erosão do leito para o caudal 2000 m³/s

Para este caudal, o escoamento processa-se de forma tranquila. Não se verifica a inundação das plataformas laterais da concha e não se observa o galgamento da plataforma da central.

- **Caudal de 2750 m³/s**

Das soluções ensaiadas referentes ao caudal 2750 m³/s (Foto 53 e Foto 54) verificou-se que a Solução E provoca erosões na margem esquerda e direita com maior expressão. A maior incidência verifica-se na margem esquerda com uma escavação de 10 m de profundidade a uma distância de 15 m do lábio da concha de rolo e uma deposição de 8 m de altura a uma distância de 115 m do lábio da concha de rolo



Foto 53 – Solução E. Escoamento do caudal 2750 m³/s



Foto 54 – Solução E. Erosão do leito para o caudal 2750 m³/s

4.3.7 Comparação entre as soluções C, D e E

Procedeu-se à comparação do funcionamento hidráulico das três soluções de concha de rolo com 14 m de raio e dentes de larguras diferentes (1,25 m, 1,88 m e 2,50 m), designadas por C, D e E. Esta comparação baseou-se na análise da acção erosiva do escoamento no leito do rio tendo-se procedido, para esse efeito, ao levantamento dos perfis longitudinais do leito a jusante da concha de rolo. Estes levantamentos foram efectuados ao longo do centro do rio e junto às margens esquerda e direita a partir da determinação das curvas de nível do terreno conforme descrito em 4.3.1. A comparação entre os perfis longitudinais obtidos para cada solução é apresentada na Figura 11 (500 m³/s), Figura 12 (1000 m³/s), Figura 13 (2000 m³/s) e Figura 14 (2750 m³/s).

Como se pode observar nas figuras referidas, após os ensaios a configuração do leito apresenta uma fossa de erosão a jusante da concha de rolo seguida de uma barra correspondente à acumulação do material erodido. Este padrão de erosão seguido de barra resulta do funcionamento da concha de rolo.

Refira-se que nos ensaios não se observou a entrada de blocos para o interior da concha. No entanto, o eventual funcionamento assimétrico das comportas pode criar recirculações do escoamento que, dependendo da intensidade das correntes, podem arrastar blocos de rocha para interior do dissipador de energia.

Do conjunto de soluções ensaiadas, a solução C parece conduzir, globalmente, a maiores erosões no leito para a gama de caudais ensaiados. A solução E conduz a erosões maiores para o caudal de 2750 m³/s.

Conclui-se que, das soluções ensaiadas, a solução D é que apresenta um comportamento globalmente mais adequado.

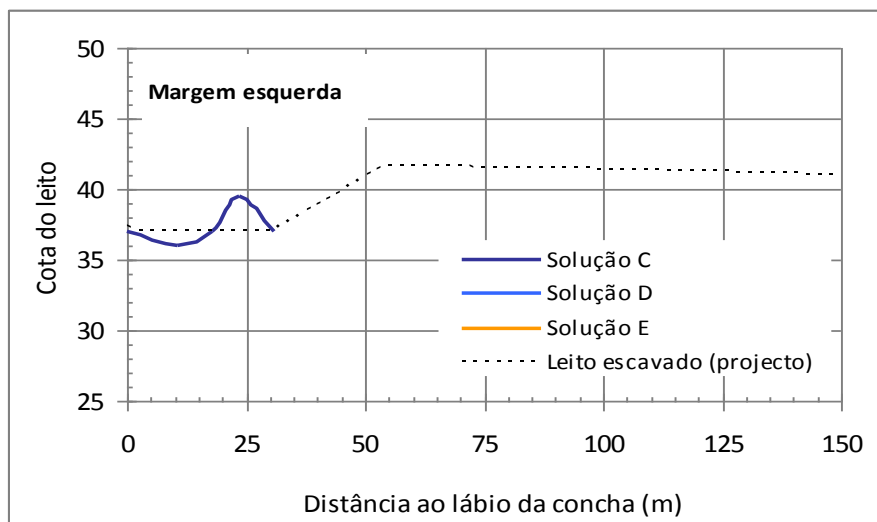
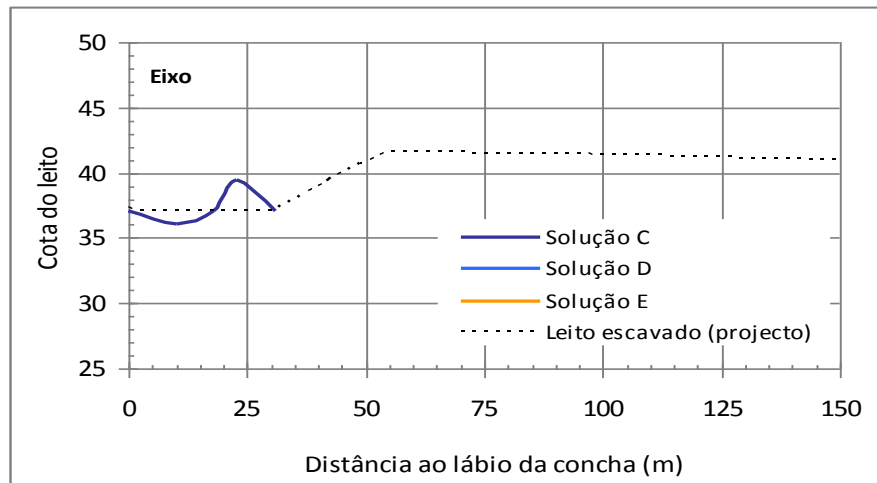
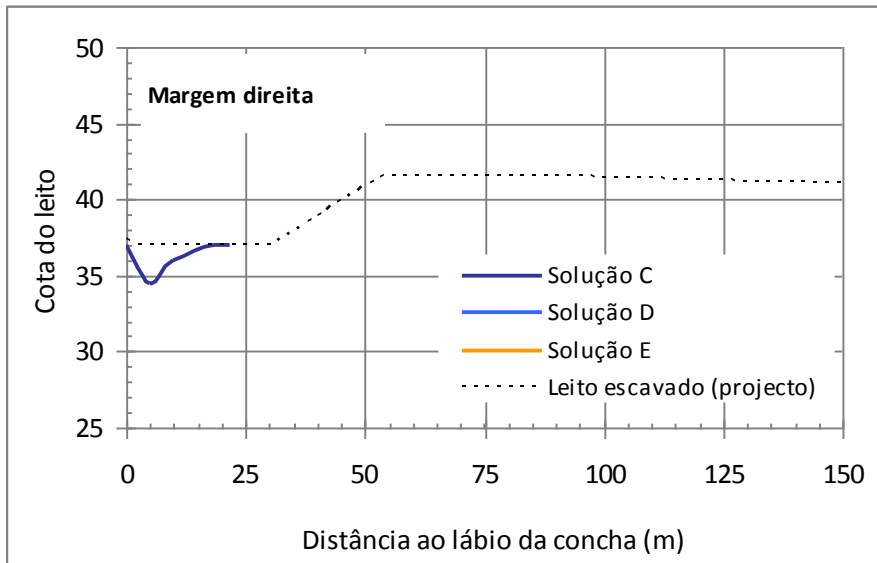


Figura 11– Perfil longitudinal do leito para $Q= 500 \text{ m}^3/\text{s}$

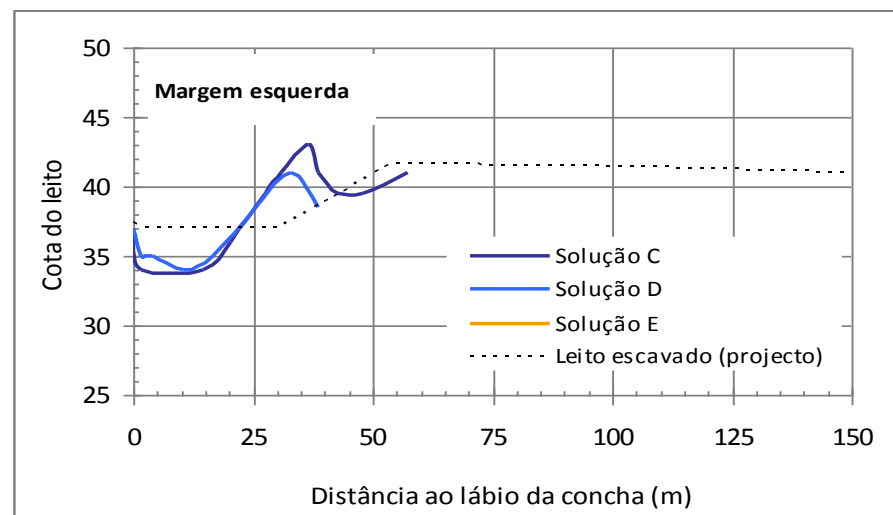
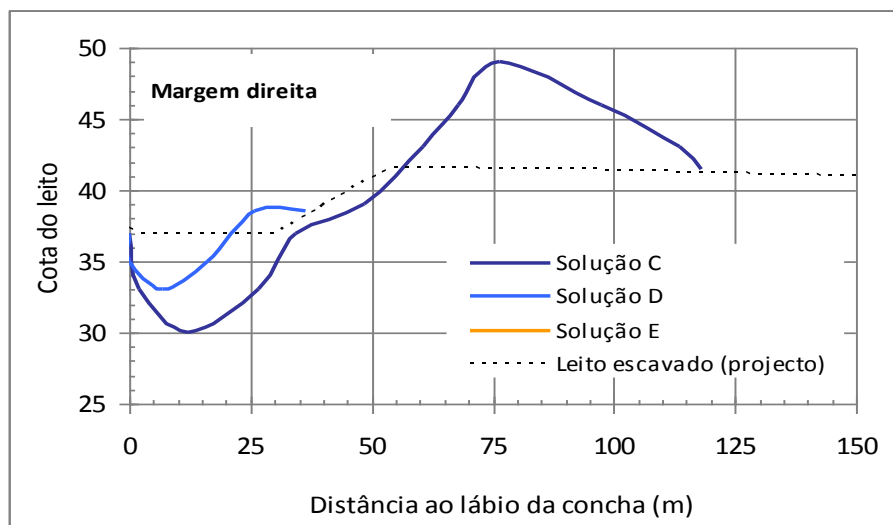
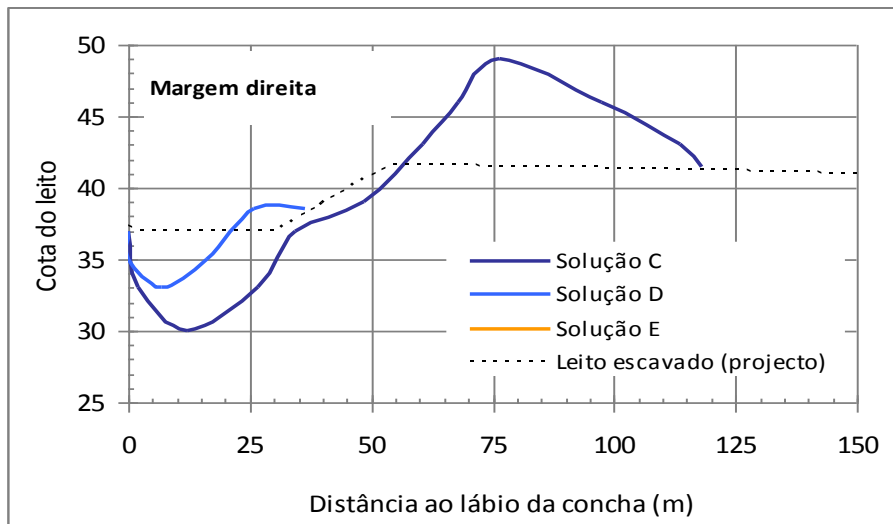


Figura 12 – Perfil longitudinal do leito para $Q = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$

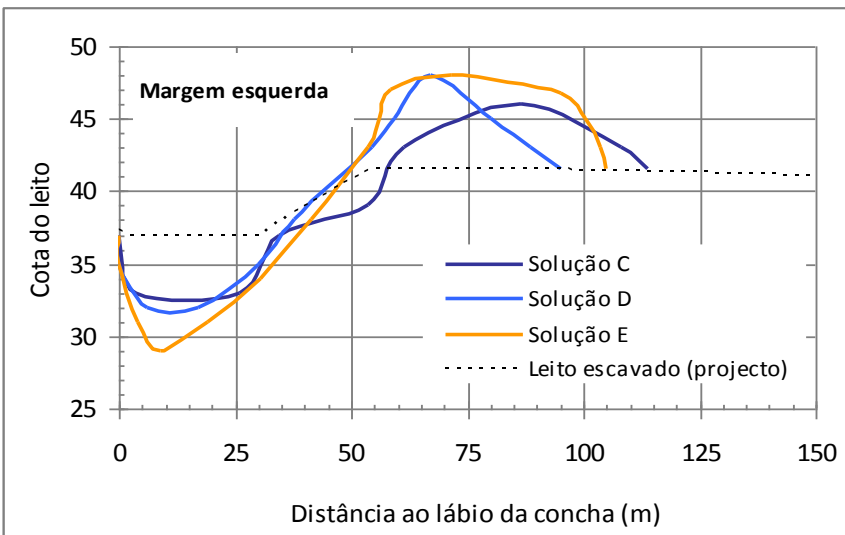
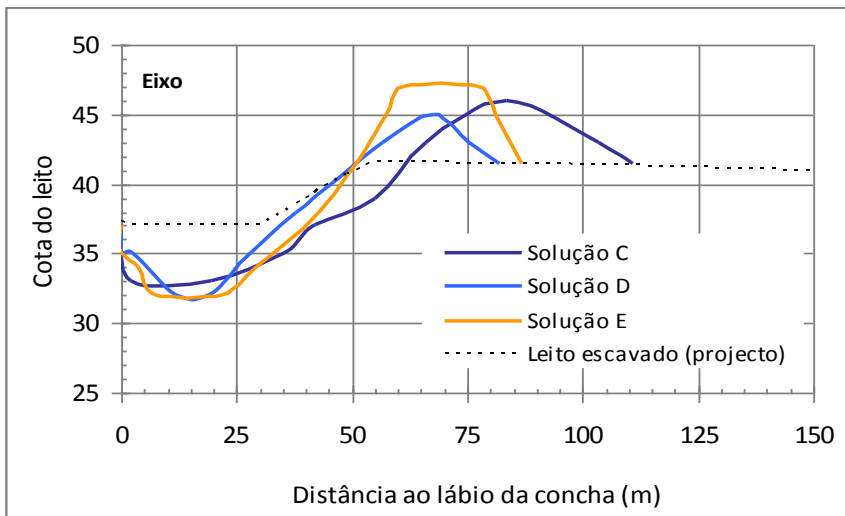
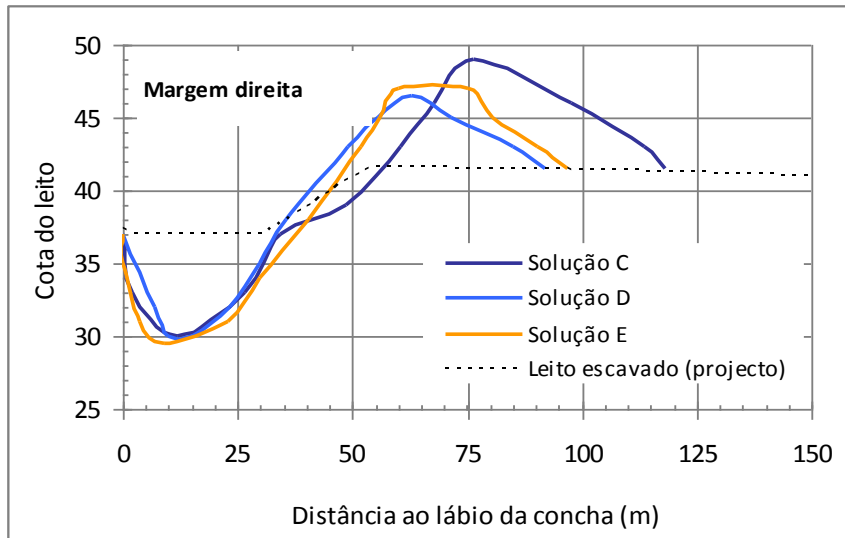


Figura 13–Perfil longitudinal do leito para $Q= 2000 \text{ m}^3/\text{s}$

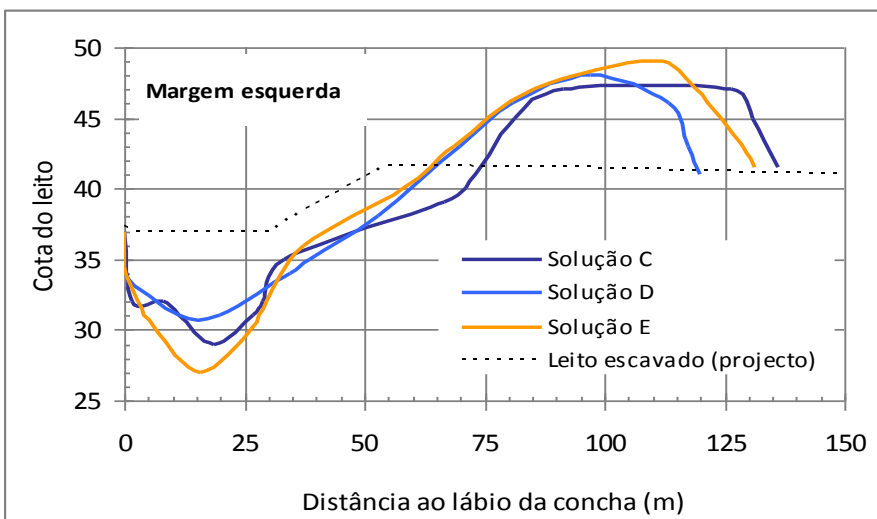
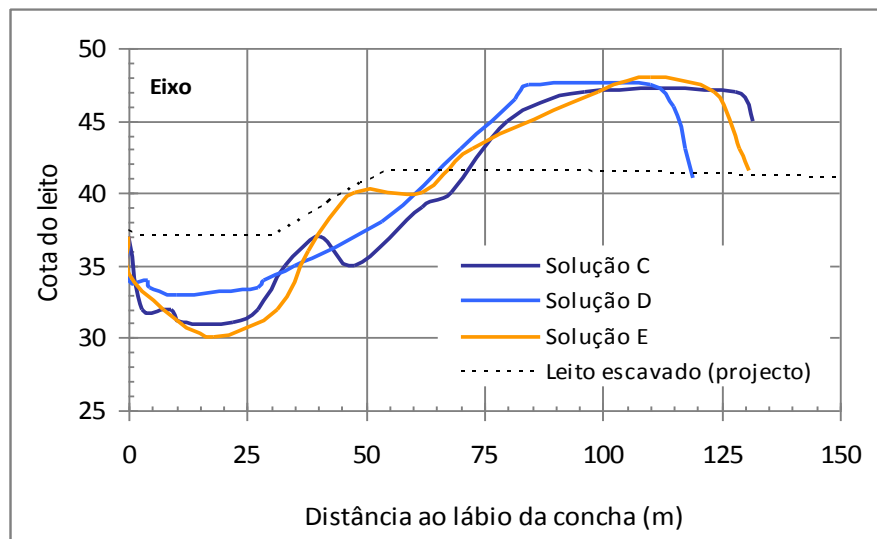
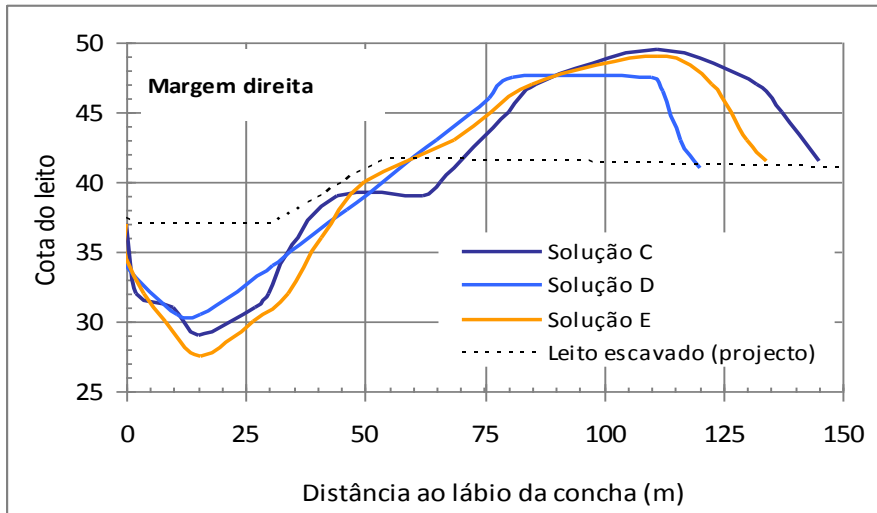


Figura 14–Perfil longitudinal do leito para $Q= 2750 \text{ m}^3/\text{s}$

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho efectuou-se um estudo experimental em modelo reduzido de um descarregador de cheias tipo concha de rolo. Ensaíram-se diferentes configurações geométricas da concha de rolo, com e sem dentes, verificando-se o seu funcionamento hidráulico para diferentes caudais. Efectuaram-se levantamentos do leito do fundo para avaliar as erosões do leito para os diferentes caudais.

Nos ensaios realizados com concha de rolo sem dentes verificou-se que esta solução não é, do ponto de vista hidráulico, adequada devido à instabilidade do rolo na concha, caracterizada por um movimento oscilatório do rolo. Para a sua fixação foi necessária a colocação de dentes na concha.

Com base nos resultados obtidos tecem-se as seguintes conclusões:

- A dissipação de energia na concha de rolo é adequada, garantindo condições de escoamento tranquilas na zona de restituição.
- Para os caudais mais elevados, a acção do escoamento no leito resulta na ocorrência de erosões a uma distância suficientemente grande do pé da estrutura. Observa-se também a deposição do material a montante da saída da restituição a uma distância adequada da mesma.

De entre as soluções ensaiadas, concluiu-se que a solução D correspondente a uma estrutura compacta com o raio da concha de rolo de 14 m, com 14 dentes de 2,75 m altura, 1,88 m de largura e espaçamento entre os dentes de 1 m é, em termos gerais, adequada à restituição dos caudais descarregados pela barragem, sendo a que conduz, globalmente às menores erosões do leito.

O eventual funcionamento assimétrico das comportas pode criar recirculações do escoamento que, dependendo da intensidade das correntes, podem arrastar blocos de rocha para interior do dissipador de energia

A solução em concha de rolo mostrou ser adequado do ponto de vista do funcionamento hidráulico. Do ponto de vista económico é também uma boa solução

quando comparada com uma alternativa tipo bacia de dissipação por ressalto, que implicaria a construção de lajes e paredes de betão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Larras, J. – A Hidráulica, Publicações Europa-América, 1979.

Lemos, F. O. – Directiva para a colocação das comportas nos descarregadores das barragens, LNEC, Memória Nº 469, Lisboa, 1975.

Lemos, F.O. -- Critério para o dimensionamento hidráulico de barragens descarregadoras, LNEC, Memória Nº 556, Lisboa, 1981.

O'Loughlin, E.M., Mehrotra, S.C., Chang, Y.C. e Kennedy, J.F – Scale effects in hydraulic model tests of rock protected structures - IIHR Report nº 124, University of Iowa, 1970.

Pinheiro, A.N. – Obras de Dissipação de Energia, AEIST, Lisboa, 2006.

USBR. 1987. Design of small dams. 3^{ed}. United States Bureau of Reclamation.

Water Resources Technical Publication. US. Dept. Interior, Washington.

ANEXO

Levantamentos do leito obtidos nos ensaios em modelo físico para diferentes
soluções de concha de rolo e caudais

Quadro A.1 – Levantamentos dos perfis longitudinais para o caudal 500 m³/s

Solução C

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)
0,00	37,00
5,00	34,50
10,00	36,00
18,50	37,00
21,50	37,00

Solução D (sem erosões)

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)

Solução E (sem erosões)

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)

Solução C

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)
0,00	37,00
10,00	36,00
18,00	37,00
23,00	39,50
31,00	37,00

Solução D (sem erosões)

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)

Solução E (sem erosões)

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)

Solução C

Margem esquerda	
Distância (m)	Cotas (m)
0,00	37,00
10,50	36,00
18,00	37,00
23,50	39,50
31,00	37,00

Solução D (sem erosões)

Margem esquerda	
Distância (m)	Cotas (m)

Solução E (sem erosões)

Margem esquerda	
Distância (m)	Cotas (m)

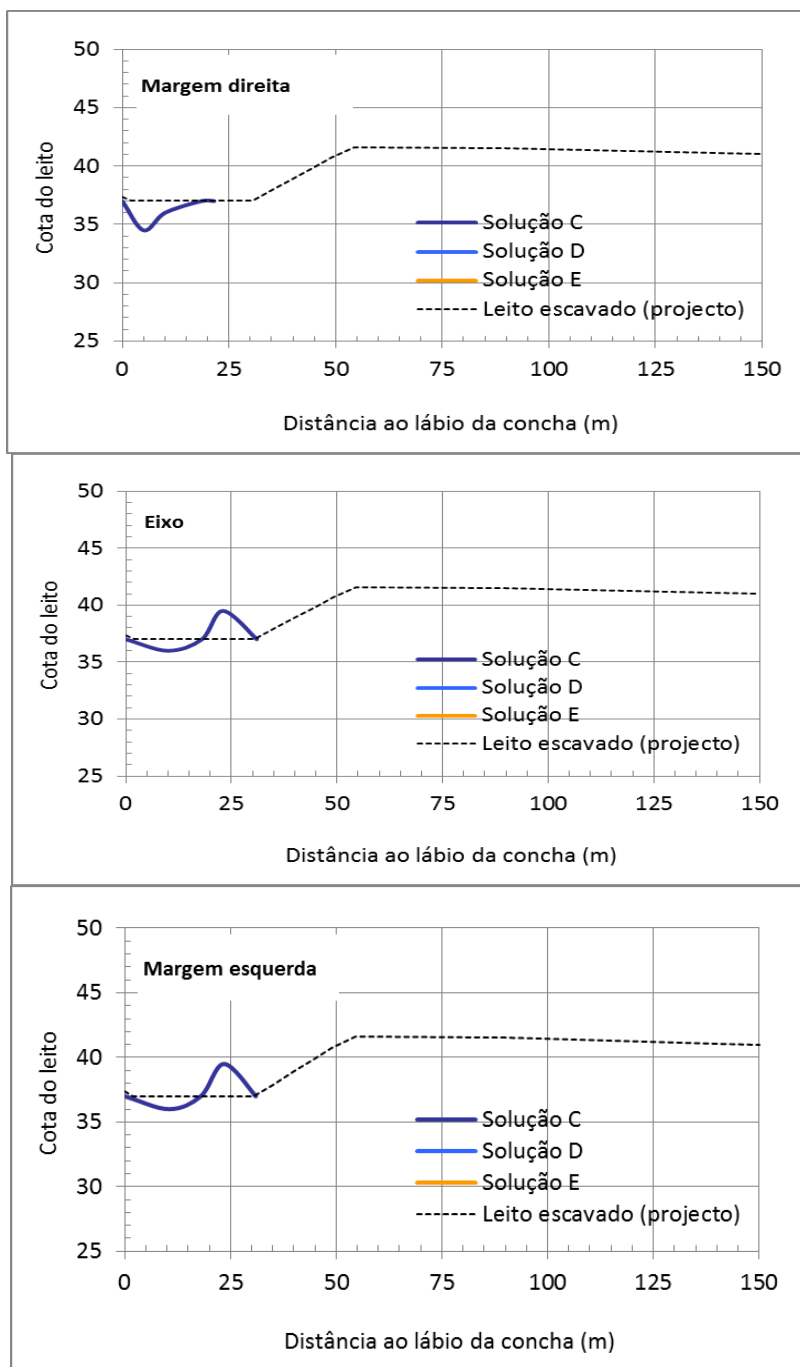


Figura A.1 – Perfis longitudinais do leito para o caudal 500 m³/s

Quadro A.2 – Levantamentos dos perfis longitudinais para o caudal 1000 m³/s (Cont.)

Solução C

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,00	37,00
1,50	34,00
14,50	34,00
20,50	36,00
27,50	39,50
31,00	41,00
36,50	43,00
38,50	41,00
42,50	39,50
48,00	39,50
57,50	41,00

Solução D

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,00	37,00
1,50	35,00
4,00	35,00
10,50	34,00
16,50	35,00
25,50	38,50
33,00	41,00
38,50	38,50

Solução E (sem erosões)

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)

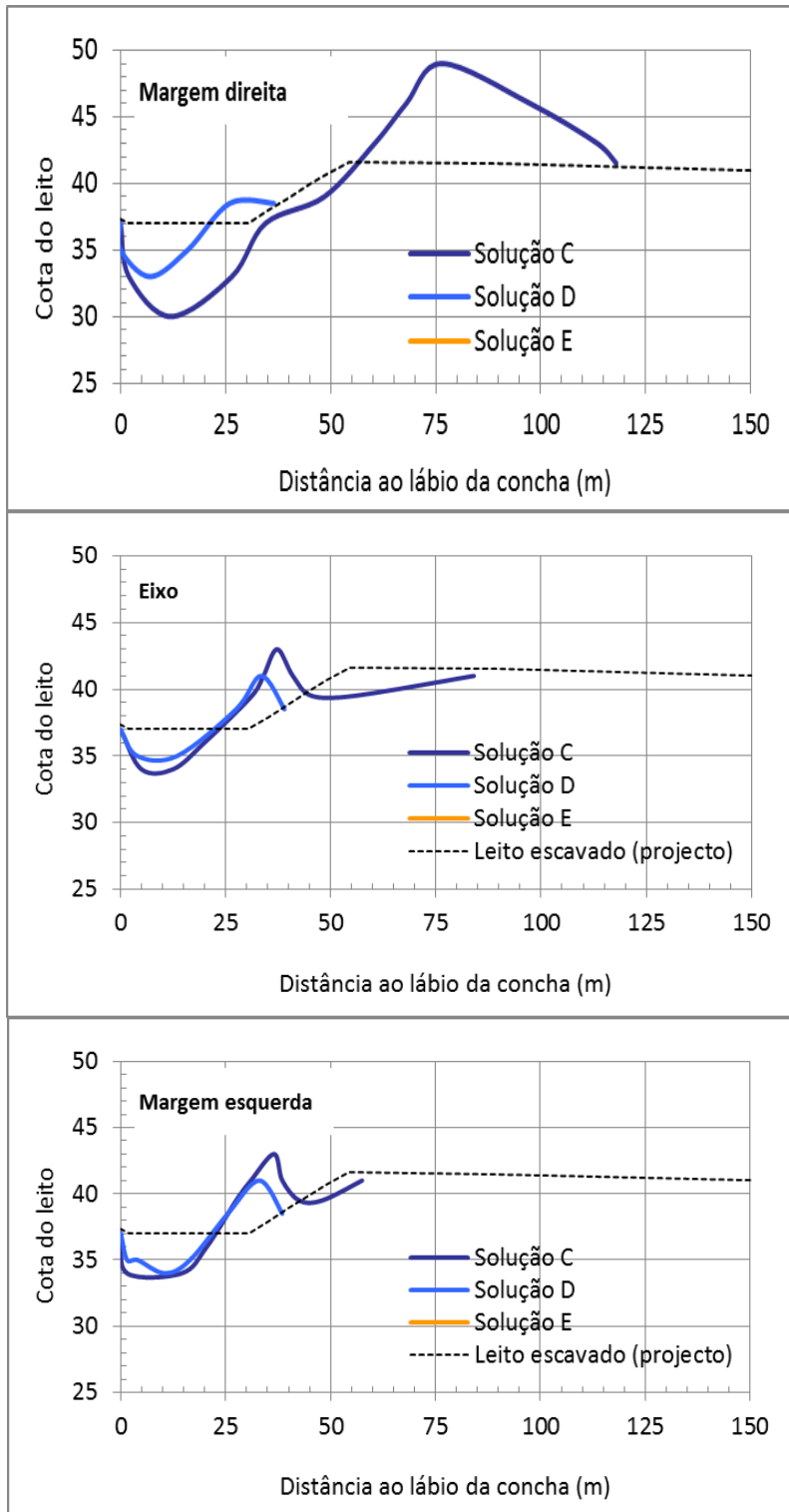


Figura A.2 – Perfis longitudinais do leito para o caudal 1000 m³/s

Quadro A.3 – Levantamentos dos perfis longitudinais para o caudal 2000 m³/s

Solução C

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
2,0	33,0
12,0	30,0
26,5	33,0
34,5	37,0
48,5	39,0
60,5	43,0
68,0	46,0
76,5	49,0
97,5	46,0
113,5	43,0
118,0	41,5

Solução D

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
7,0	32,0
10,0	30,0
15,0	30,0
23,5	32,0
30,0	35,0
35,7	38,0
49,0	43,0
55,5	45,0
63,0	46,5
71,5	45,0
85,0	43,0
92	41,50

Solução E

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	35,0
3,5	31,0
9,0	29,5
23,0	31,0
30,0	34,0
40,5	38,0
52,0	43,0
56,0	45,0
60,0	47,0
75,0	47,0
80,5	45,00
90,5	43,00
97	41,50

Solução C

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
2,0	33,0
19,5	33,0
35,5	35,0
42,0	37,0
55,0	39,0
66,0	43,0
83,5	46,0
103,5	43,0
111	41,5

Solução D

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	35,0
2,5	35,0
12,0	32,0
19,0	32,0
28,0	35,0
38,0	38,0
56,5	43,0
67,5	45,0
75,5	43,0
82	41,50

Solução E

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	35,0
3,5	34,0
7,5	32,0
22,1	32,0
29,5	34,0
43,0	38,0
54,0	43,0
57,4	45,0
61,0	47,0
77,5	47,0
81,1	45,0
84,50	43,00
87	41,5

Quadro A.3 – Levantamentos dos perfis longitudinais para o caudal 2000 m³/s (Cont.)

Solução C

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
3,5	33,0
26,0	33,0
34,5	37,0
53,5	39,0
61,5	43,0
86,5	46,0
108,0	43,0
114	41,5

Solução D

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	35,0
6,0	32,0
17,0	32,0
30,0	35,0
38,0	38,0
54,5	43,0
59,2	45,0
67,0	48,0
80	45
88,5	43
95	41,50

Solução E

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	35,0
4,0	31,0
9,0	29,0
19,0	31,0
30,5	34,0
41,5	38,0
53,5	43,0
56,0	45,0
58,5	47,0
71,5	48,0
95,0	46,8
100,5	45,0
103,5	43,0
105	41,5

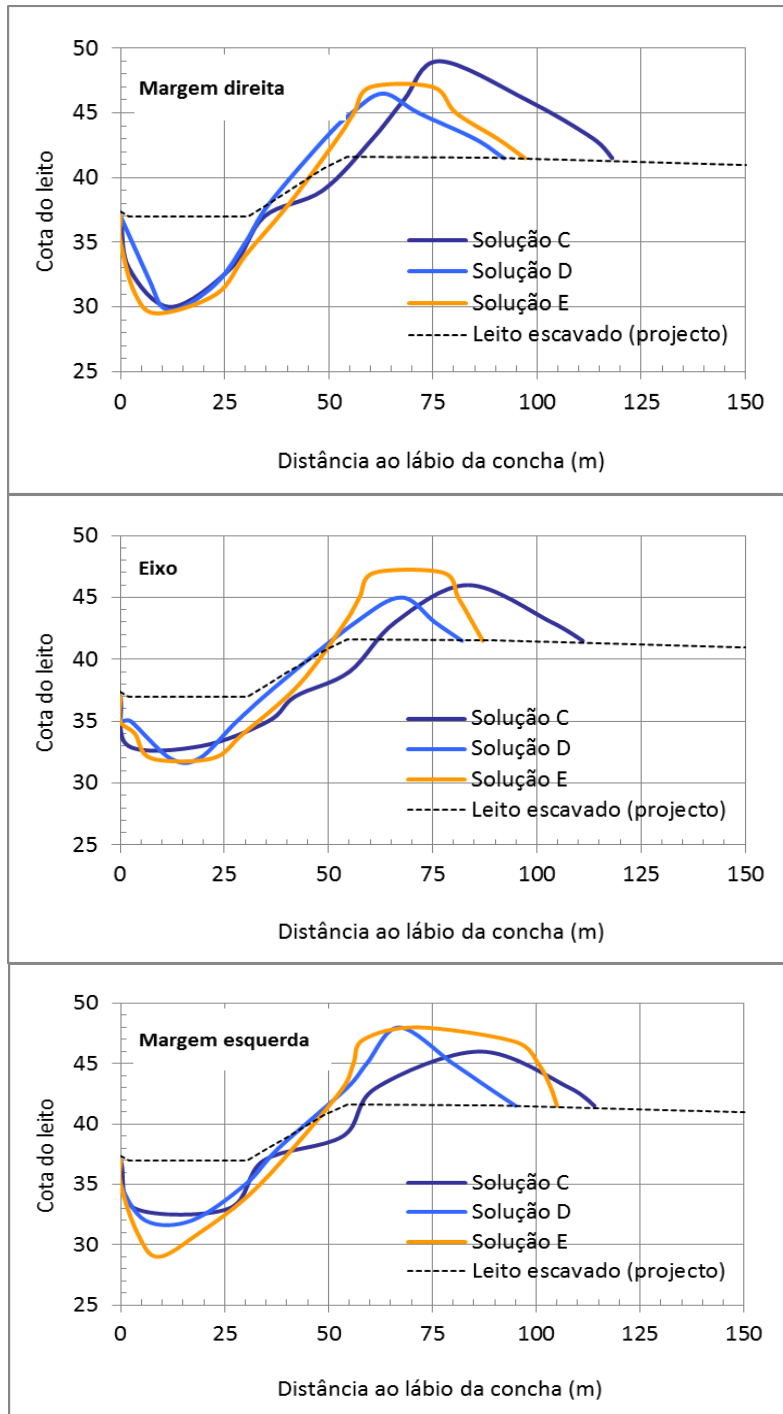


Figura A.3 – Perfis longitudinais do leito para o caudal 2000 m³/s

Quadro A.4 – Levantamentos dos perfis longitudinais para o caudal 2750 m³/s

Solução C

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
2,0	32,0
10,0	31,0
15,0	29,0
27,0	31,0
30,0	32,0
34,0	35,0
44,0	39,0
62,0	39,0
66,0	40,0
80,0	45,0
86,0	47,0
111,0	49,5
132,0	47,0
137,5	45,0
145,0	41,5

Solução D

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	34,0
10,5	30,5
15,5	30,5
30,5	34,0
34,5	35,0
46,0	38,0
65,0	43,0
76,0	46,0
81,0	47,5
110,0	47,5
112,5	46,5
116,0	43,0
120,0	41,0

Solução E

Margem direita	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	34,5
3,5	32,0
8,0	30,0
15,5	27,5
26,5	30,0
34,0	32,0
41,0	36,0
50,0	40,0
68,5	43,0
85,0	47,0
111,0	49,0
122,5	47,0
130	43,00
134	41,50

Quadro A.4 – Levantamentos dos perfis longitudinais para o caudal 2750 m³/s (Cont.)

Solução C

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
3,0	32,0
7,0	32,0
9,0	32,0
11,5	31,0
22,0	31,0
27,5	32,0
33,0	35,0
40,5	37,0
47,5	35,0
62,0	39,0
68,0	40,0
80,0	45,0
96,0	47,0
128,0	47,0
131,5	45,0
136,0	41,5

Solução D

Eixo	
Distância (m)	Cotas (m)
0,0	37,0
0,0	34,0
4,0	34,0
4,5	33,5
10,0	33,0
27,5	33,5
28,5	34,0
35,0	35,0
53,5	38,0
70,0	43,0
81,5	46,5
84,5	47,5
110,0	47,5
115,0	46,0
117,5	43,0
119,0	41,0

Solução E

Eixo	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	34,5
7,5	32,0
18,0	30,0
31,5	32,0
38,0	36,0
47,5	40,0
61,8	40,0
72,5	43,0
99,0	47,0
110,0	48,0
123,5	47,0
129,0	43,0
131,0	41,5

Quadro A.4 – Levantamentos dos perfis longitudinais para o caudal 2750 m³/s (Cont.)

Solução C

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
1,5	32,0
8,0	32,0
11,5	31,0
18,5	29,0
27,0	31,0
29,0	32,0
33,5	35,0
66,5	39,0
71,0	40,0
81,5	45,0
91,5	47,0
126,5	47,0
131,0	45,0
136	41,5

Solução D

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	34,0
11,5	31,0
20,0	31,0
34,5	34,0
38,5	35,0
53,0	38,0
70,0	43,0
81,0	46,0
97,0	48,0
113,5	46,0
117,5	43,0
120,0	41,0

Solução E

Margem esquerda	
Distância (m)	Cota (m)
0,0	37,0
0,0	34,5
3,0	32,0
6,5	30,0
16,0	27,0
26,5	30,0
29,5	32,0
37,5	36,0
58,0	40,0
68,5	43,0
85,5	47,0
110,0	49,0
119,0	47,0
129,0	43,0
131,5	41,5

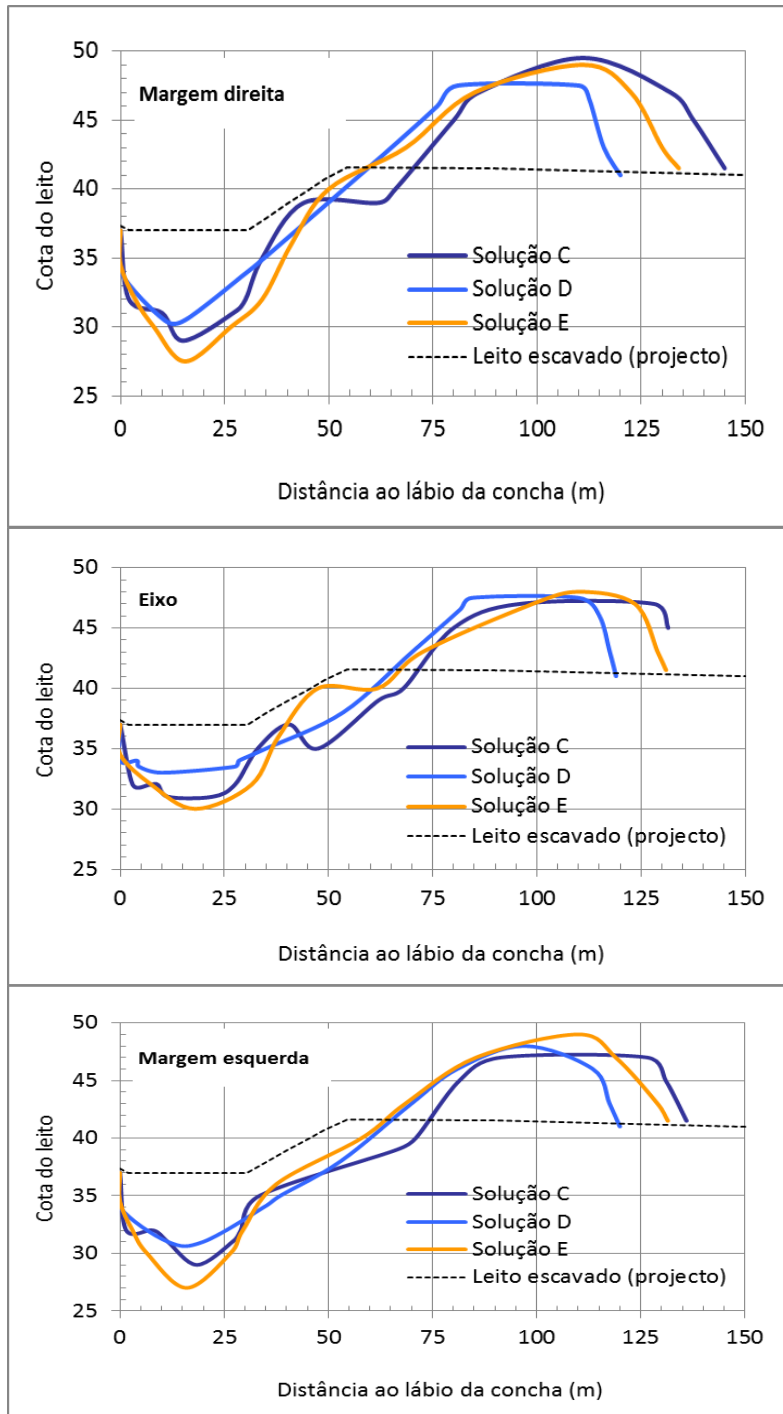


Figura A.4 – Perfis longitudinais do leito para o caudal 2750 m³/s