

MINISTÉRIO DAS OBRAS PÚBLICAS
LABORATÓRIO NACIONAL DE ENGENHARIA CIVIL

SERVIÇO DE HIDRÁULICA
DIVISÃO DE HIDRÁULICA FLUVIAL

Proc.62/1/311

ESTUDO SISTEMÁTICO DOS ASSOREAMENTOS DAS ALBUFEIRAS

2º Relatório

Estudo geral. 1º Volume. Texto

Estudo realizado para a DIRECÇÃO-GERAL DOS RECURSOS
E APROVEITAMENTOS HIDRÁULICOS

Lisboa, Junho de 1976

SUMÁRIO

O presente relatório apresenta um estudo geral e pouco profundo dos problemas levantados pelo assoreamento das albufeiras. Como orientação do estudo procurou-se tratar os assuntos desde os mais gerais até aos mais particulares. Assim inicia-se o relatório por uma descrição geral dos fenómenos sedimentológicos na bacia hidrográfica (erosão, transporte e sedimentação) por ser esta a unidade natural de estudo em todos os problemas postos com a exploração dos aproveitamentos hidráulicos. Em seguida descreve-se qualitativamente o assoreamento das albufeiras. Com o conhecimento dado pela descrição anterior mostram-se as técnicas utilizadas na observação dos assoreamentos quer a observação do seu mecanismo quer a das suas consequências, isto é, o levantamento (topo-hidrográfico e sedimentológico) dos depósitos na albufeira.

Como passo seguinte para o aprofundamento da compreensão dos fenómenos de deposição de sedimentos nas albufeiras é examinada também a possibilidade de se preverem os assoreamentos por meio de modelos, quer físicos quer matemáticos. O objectivo final de todos os estudos anteriores deve culminar no controle do assoreamento empregando conjuntamente métodos preventivos e métodos curativos.

Por último tecem-se algumas considerações finais tendo em vista a situação particular dos problemas do assoreamento das albufeiras portuguesas.

ÍNDICE DO TEXTO

	Pág.
1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 - Importância do estudo dos assoreamentos das albufeiras	1
1.2 - Objectivos do estudo e do relatório	4
2 - DESCRIÇÃO QUALITATIVA DO ASSOREAMENTO DAS ALBUFEIRAS	8
2.1 - Introdução. Erosão, transporte e deposição dos sedimentos	8
2.2 - Alteração do regime de erosão, transporte e deposição dos sedi- mentos provocada pela construção de barragens	13
2.3 - Deposição dos sedimentos finos no interior da albufeira	19
2.3.1 - Generalidades	19
2.3.2 - Corrente de densidade	20
2.3.2.1 - Generalidades	20
2.3.2.2 - Formação das correntes de densidade	22
2.3.2.3 - Propagação e eliminação das correntes de densidade	23
2.3.3 - Efeito das descargas de fundo e de superfície sobre as cor- rentes de densidade	26
2.3.4 - Evolução do fundo da albufeira	29
2.4 - Conclusões	32
3 - TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO DOS ASSOREAMENTOS DAS ALBUFEIRAS	34
3.1 - Observação dos mecanismos da erosão, transporte e sedimentação	34
3.1.1 - Introdução	34
3.1.2 - Observação do mecanismo da erosão	34
3.1.3 - Observação do mecanismo do transporte sólido	35
3.1.4 - Observação do mecanismo da deposição dos sedimentos	37
3.1.5 - Exemplos de campanhas de observação do mecanismo do assorea- mento de albufeiras	38
3.2 - Observação dos assoreamentos das albufeiras. Levantamentos ...	40

	Pág.
3.2.1 - Introdução	40
3.2.2 - Técnicas de levantamentos topo e hidrográfico em albufeiras	43
3.2.2.1 - Métodos utilizados para a determinação da superfície dos depósitos	43
3.2.2.2 - Equipamento utilizado nos levantamentos	45
3.2.2.3 - Cálculo do volume dos depósitos	50
3.2.3 - Técnica de levantamento sedimentológico em albufeiras	57
3.2.3.1 - Planeamento dos levantamentos	57
3.2.3.2 - Equipamento para recolha de amostras.....	59
3.2.3.3 - Análise dos resultados	66
3.3 - Conclusões	71
4 - UTILIZAÇÃO DE MODELOS NO ESTUDO SISTEMÁTICO DO ASSOREAMENTO DAS ALBUFEIRAS	72
4.1 - Introdução	72
4.2 - Previsão do transporte sólido afluente à albufeira	74
4.2.1 - Generalidades	74
4.2.2 - Modelos matemáticos que prevêem a quantidade do material sólido afluente à albufeira	75
4.2.2.1 - Introdução	75
4.2.2.2 - Modelos matemáticos do transporte sólido	76
4.2.2.3 - Modelos matemáticos de "produção de sedimentos"	78
4.3 - Deposição dos sedimentos na albufeira	85
4.3.1 - Modelos físicos	85
4.3.1.1 - Modelos com fundo móvel formado por materiais sólidos incoerentes transportados por arrastamento	85
4.3.1.2 - Modelos com fundo móvel formado por materiais sólidos coerentes transportados em suspensão	89
4.3.1.3 - Simulação das correntes de densidade	90

	Pág.
4.3.1.4 - Modelos analógicos aerodinâmicos	92
4.3.2 - Modelos matemáticos	94
4.3.2.1 - Modelos matemáticos da sedimentação nas albufeiras	94
4.3.2.2 - Modelos matemáticos simples do assoreamento das albufeiras	102
4.3.3 - Modelos matemáticos de previsão do peso específico dos sedi- mentos depositados nas albufeiras	112
4.4 - Conclusões	115
5 - CONTROLE DO ASSOREAMENTO DAS ALBUFEIRAS	117
5.1 - Introdução	117
5.2 - Métodos utilizados no controle do assoreamento das albufeiras	119
5.2.1 - Métodos preventivos da erosão na bacia hidrográfica	119
5.2.2 - Métodos preventivos da sedimentação das albufeiras	121
5.2.3 - Métodos curativos do assoreamento das albufeiras	124
5.3 - Inclusão de estudos sedimentológicos no projecto de aproveita- mentos hidráulicos	126
6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS. APLICAÇÃO AO CASO PORTUGUÊS	132
BIBLIOGRAFIA	137

ÍNDICE DOS QUADROS

- QUADRO 2.1 - Processos de erosão
- " 2.2 - Taxa de erosão do passado e actuais
 - " 2.3 - Taxas relativas de erosões em terras altas e baixas em climas diferentes
 - " 2.4 - Dados de transporte sólido de vários rios
 - " 2.5 - Peso específico dos depósitos em albufeiras
 - " 2.6 - Assoreamento de albufeiras argelinas
 - " 2.7 - Assoreamento de albufeiras dos Estados Unidos da América
 - " 2.8 - Assoreamento de albufeiras indianas
 - " 2.9 - Assoreamento de albufeiras russas
 - " 3.1 - Comparação de métodos de cálculo de capacidade de pequenas albufeiras
 - " 3.2 - Exemplo de cálculo do peso específico de um sector limitado por dois perfis
 - " 3.3 - Eficiência de equações de regressão no cálculo do peso específico de sedimentos depositados em albufeiras
 - " 4.1 - Dados iniciais das áreas das superfícies de nível e capacidade de uma albufeira
 - " 4.2 - Determinação da cota atingida pelos sedimentos depositados junto à barragem
 - " 4.3 - Cálculo da distribuição dos sedimentos depositados numa albufeira
 - " 4.4 - Relação entre a dimensão dos sedimentos depositados e o peso específico inicial
 - " 4.5 - Valores dos coeficientes da fórmula de Lane e Koelzer
 - " 4.6 - Valores dos coeficientes modificados segundo Lara

ÍNDICE DAS FIGURAS

- Fig. 2.1 - Relações dos vários factores de erosão
- " 2.2 - Corte longitudinal dos depósitos de uma albufeira em vale estreito
- " 2.3 - Planta esquemática dos depósitos de uma albufeira em vale largo
- " 2.4 - Imersão das águas turvas numa albufeira
- " 2.5 - Variação no tempo da densidade da água de uma albufeira a montante do descarregador de fundo
- " 2.6 - Consolidação de sedimentos finos
- " 2.7 - Índice de vazios em função da pressão, para argila e para a areia
- " 2.8 - Aspectos de depósitos argilosos expostos ao ar
- " 2.9 - Pormenor de depósitos argilosos
- " 2.10 - Relação entre o peso específico dos sedimentos depositados e a percentagem de areia
- " 3.1 - Esquema de colocação e numeração de perfis transversais de uma albufeira para o seu levantamento
- " 3.2 - Montagem num barco de uma sonda de eco. Emissor-receptor
- " 3.3 - Esquema de funcionamento de sonda de eco
- " 3.4 - Registo de levantamento de um perfil com sonda de eco
- " 3.5 - Roda medidora para determinar a posição do barco no perfil
- " 3.6 - Dispositivo de registo automático da posição de um barco em movimento num levantamento de uma albufeira
- " 3.7 - Barco e equipamento auxiliar para levantamento de albufeiras
- " 3.8 - Curva da variação da área da superfície de nível de uma albufeira
- " 3.9 - Esquema mostrando o significado geométrico dos parâmetros que

entram na fórmula prismoidal modificada

Fig. 3.10 - Curva da variação da área do perfil transversal com a distância,

- " ao longo do talvegue, desse perfil à barragem
- " 3.11 - Esquema de localização dos perfis para o levantamento de albu-
feiras pequenas
- " 3.12 - Esquema mostrando o significado geométrico dos valores que en-
tram na fórmula de Bakin
- " 3.13 - Vários tipos de amostradores de sedimentos
- " 3.14 - Vara escavadora
- " 3.15 - Amostrador de gravidade
- " 3.16 - Amostrador de êmbolo
- " 3.17 - Amostrador de êmbolo
- " 3.18 - Amostrador com vibrador
- " 3.19 - Sonda de raios gama para determinar "in situ" o peso específico
dos sedimentos depositados
- " 3.20 - Extremidade da sonda de raios gama
- " 3.21 - Medição do peso específico dos depósitos com sonda de raios gama
- " 3.22 - Relação entre o peso específico dos depósitos e a sua profundida
de
- " 3.23 - Divisão da albufeira em sectores por intermédio de perfis trans-
versais
- " 3.24 - Linhas de igual peso específico num perfil transversal
- " 3.25 - Sector de uma albufeira. Determinação do peso específico médio
desse sector
- " 3.26 - Planta de albufeira indicando o peso específico médio dos depósi
tos dos sectores (tf/m^3)
- " 3.27 - Relação entre o peso específico a uma determinada profundidade e
distância ao longo do talvegue à barragem

- Fig. 3.28 - Relação entre o peso específico e a percentagem de argila
- " 3.29 - Relação entre a percentagem de argila e a distância ao longo do talvegue, à barragem
- " 3.30 - Comparação entre os pesos específicos medidos com a sonda de raios gama e os obtidos pela análise de amostras recolhidas
- " 4.1 - Modelo para simular o processo erosivo, num solo, pela acção da precipitação
- " 4.2 - Variação da erosão com a precipitação útil (obtida por intermédio de registos em estações de medição de caudal sólido)
- " 4.3 - Variação da erosão com a precipitação útil (obtida por intermédio de levantamentos de albufeiras)
- " 4.4 - Processos erosivos e de transporte sólido utilizado no modelo sedimentológico de Stanford
- " 4.5 - Fluxograma do modelo sedimentológico
- " 4.6 - Notações utilizadas no cálculo de turvação pelo método das diferenças finitas segundo modelo de Karaushev. Planta de escoamento
- " 4.7 - Capacidade de retenção de uma albufeira segundo Churchill
- " 4.8 - Capacidade de retenção de uma albufeira segundo Brune
- " 4.9 - Relação entre a profundidade e a capacidade de uma albufeira
- " 4.10 - Classificação empírica das albufeiras em quatro tipos a partir da relação entre a profundidade e a respectiva capacidade
- " 4.11 - Curvas empíricas para determinar a profundidade dos sedimentos depositados junto à barragem
- " 4.12 - Curvas empíricas que relacionam a profundidade com a área relativa da superfície de nível para cada um dos 4 tipos de albufeiras
- " 4.13 - Curvas da área da superfície de nível e de capacidade de uma

albufeira, iniciais e corrigidas

Fig. 4.14 - Áreas dos sedimentos depositados numa albufeira

" 4.15 - Perfil longitudinal, inicial e corrigido, de uma albufeira

" 4.16 - Gráfico para a determinação do coeficiente X da fórmula de
Miller

" 5.1 - Esquema de terreno com terraços

ÍNDICE DOS ANEXOS

ANEXO A - Dados sobre albufeiras portuguesas

- I - Aproveitamentos hidroeléctricos e hidroagricolas com barragens de altura superior a 20 metros
- II - Relatórios publicados sobre a observação dos assoreamentos de albufeiras
- III - Quadro resumo dos resultados das observações efectuadas na gumas albufeiras

ANEXO B - Normas para a exploração, no que respeita à manobra das descargas de fundo, das albufeiras a cargo das Associações de Regantes e Beneficiários.

ESTUDO SISTEMÁTICO DOS ASSOREAMENTOS DAS ALBUFEIRAS

(2º relatório)

1 - INTRODUÇÃO

1.1 - Importância do estudo dos assoreamentos das albufeiras

As albufeiras são um dos principais meios utilizados na gestão dos recursos hídricos, tendo muitas das albufeiras múltiplos objetivos. A sua capacidade é muito variada desde as pequenas albufeiras com poucas centenas de metros cúbicos de capacidade até às grandes albufeiras que atingem capacidades da ordem das dezenas de quilómetros cúbicos e superfícies livres com áreas da ordem das dezenas de quilómetros quadrados. Contudo todas as albufeiras têm de comum a possibilidade de armazenar além da água fluvial tudo o que ela transporta, nomeadamente os sedimentos sólidos. Com efeito todos os rios transportam sedimentos. Estes sedimentos, por sua vez, têm a tendência natural para depositarem quando diminui a capacidade de transporte de escoamento, como sucede no caso das albufeiras.

O fenómeno de deposição de sedimentos nas albufeiras é um aspecto do fenómeno mais geral de deposição de sedimentos na crosta terrestre. Com efeito nesta existe uma camada superficial constituída por materiais que ou se encontram num estado granular ou são, mais ou menos facilmente, redutíveis a esse estado. A acção de agentes erosivos, tais como a água, o ar e o próprio homem, faz-se sentir de modo significativo na crosta, dando origem a erosões e a subsequente transporte e deposição de materiais granulares as quais têm implicações em muitas actividades humanas. Seria fastidiosa uma enumeração dos danos causados pela movimentação dos materiais granulares transportados pela água e até se cometeriam certamente omissões se se pretendesse esgotar os exemplos. Ora o assoreamento das albufeiras é um dos casos particulares dos pro

blemas causados pelos sedimentos.

A quantidade de sedimento depositado numa albufeira depende da quantidade de sedimento afluente a essa albufeira e ainda do grau de retenção na albufeira do sedimento afluente. Assim as albufeiras diferem muito na quantidade de sedimento depositado devido à enorme variabilidade, quer no espaço quer no tempo, da quantidade e das características dos sedimentos transportados pelos rios a elas afluentes e devido à existência de outras causas que influem a sua deposição nas mesmas, tais como forma da albufeira, seu regime de exploração, natureza do sedimento afluente, etc.

São várias as consequências do assoreamento das albufeiras. Por vezes não são apercebidos nos primeiros tempos de funcionamento da albufeira por o fenómeno de deposição ocorrer abaixo do nível da superfície livre da água; contudo passado o tempo suficiente os efeitos do assoreamento evidenciam-se de muitas formas e podem colidir com a exploração da albufeira.

Os efeitos do assoreamento das albufeiras sentem-se a montante e a jusante da barragem.

A montante um dos principais efeitos é a diminuição da capacidade de armazenamento. Isto pode implicar, desde que se não tenha tomado em consideração um valor correcto do possível assoreamento, uma diminuição da eficiência da albufeira no que diz respeito aos objectivos para a qual foi projectada, quer seja abastecimento de água (urbano ou industrial), irrigação, controle de cheias, produção de energia e navegação.

O rio a montante da barragem assoreia-se a considerável distância devido aos efeitos das curvas de regolfo no transporte sólido. A formação e o crescimento de delta, no troço onde o rio atinge a albufeira, tendem a expandir o assoreamento ainda mais para a montante. Assim a inclinação do leito do rio torna-se menor, as secções transversais do rio reduzem-se e a inundação dos terrenos marginais ocorre mais frequentemente.

A deposição dos sedimentos na albufeira pode acarretar ainda outro tipo de efeitos tais como inutilização de pequenas instalações portuárias, comerciais ou recreativas situadas nas margens da albufeira, inutilização de comportas de descargas de fundo ou de tomadas de água, danificação em turbinas ou outras máquinas hidráulicas ou até modificação da qualidade da água.

A jusante da barragem também geralmente se sentem os efeitos do assoreamento das albufeiras devido principalmente à retenção dos sedimentos na mesma. Consequentemente há uma diminuição do material sólido transportado pelo escoamento a jusante da barragem pelo que este apresenta uma maior capacidade de transporte. Com efeito o rio, que antes da construção da barragem estava em estado de equilíbrio, apresenta, depois da existência da albufeira a montante, uma diferente relação entre caudal líquido, transporte sólido, inclinação do leito, largura e profundidade do escoamento o que implica uma tendência para a degradação geral do leito do rio até se reencontrarem novas formas estáveis.

Assim podem indicar-se resumidamente as principais consequências do assoreamento das albufeiras:

- Perda de volume reservado para o armazenamento da água e consequente diminuição do tempo de vida útil da albufeira;
- Modificação dos níveis atingidos pela água na região de montante da albufeira;
- Inutilização de comportas de fundo, de tomadas de água ou de máquinas hidráulicas;
- Modificação da qualidade da água o que pode provocar entre outros efeitos a alteração da fauna e flora aquática do rio, quer na albufeira quer a jusante da barragem;
- Degradação do rio a jusante da barragem.

O processo de sedimentação do material sólido nas albufeiras é complexo.

Assim é natural que haja muitas alternativas a serem identificadas e avaliadas ao empreender-se um estudo sistemático do assoreamento das albufeiras, tendo em conta que esse estudo não deve estar desinserido de outros estudos respeitantes à erosão continental, controle de cheias, irrigação, abastecimento de água, gestão da qualidade da água, eutroficação, navegação e ecologia. Deste modo o controle do assoreamento das albufeiras, pode ser considerado uma parte integrada de um estudo mais geral da gestão dos recursos hídricos.

1.2 - Objectivos do estudo e do relatório

Em 1955 julgou-se ser a ocasião oportuna de enveredar pelo caminho da observação sistemática dos fenómenos de "erosão a jusante das restituições" para o qual se abriu o processo de estudo 311-II. O estudo teria a "vantagem para o LNEC já pela experiência que se ganharia evitando uma possível deformação profissional, já pela projecção que tal estudo teria no campo de investigação (internacional) e nos estudos em modelos reduzidos". Na altura também se acrescentava que "juntamente com as erosões a jusante das barragens haveria vantagens em estudar o assoreamento das albufeiras e o estado actual dos descarregadores". Por último julgou-se viável um futuro esquema de observação conjunta com as barragens o qual poderia designar-se "Observação de Protótipos Fluviais".

Só em 1958 apareceu um relatório prévio sobre a "Observação das erosões a jusante das obras de descarga e dos assoreamentos nas albufeiras" no qual se referia que os trabalhos para o estudo previsto "tiveram de ser retardados, por motivos de vária natureza, a que não foram alheias as dificuldades de recrutamento de pessoal especializado e a demora na aquisição da aparelhagem considerada indispensável". Neste relatório afirma-se que "tendo sido equacionado o problema, foram facultados ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) os meios que lhe abriram caminho para dar os primeiros passos no sentido de iniciar os trabalhos de uma forma decisiva, prosseguindo, desde então, com regularidade, o cumprimento de um plano cujo objectivo é o estudo anteriormente apontado". No mesmo relatório tiraram-se conclusões acerca do equipamento necessário e dos métodos a utilizar no levantamento do fundo das albufeiras e no levantamento do leito a jusante dos descarregadores.

Todavia só no plano de trabalhos para 1960 é que o processo do estudo em causa passou a ter a designação actual "Estudo sistemático das erosões a jusante dos descarregadores e dos assoreamentos das albufeiras" e começou a dar-se mais importância aos assoreamentos devendo-se isso em parte à casualidade de se ter de esvaziar a albufeira de Santa Luzia, facto que foi aproveitado para o primeiro levantamento de uma albufeira portuguesa em exploração. Nesse plano referia-se que "após o estágio de um experimentador chefe engenheiro geógrafo iniciar-se-ia o estudo sistemático do assoreamento das albufeiras". No entanto de facto o trabalho efectuado incidiu mais no levantamento do leito a jusante dos descarregadores do que no levantamento do fundo de albufeiras. Até 1966 só se fizeram 6 levantamentos, 3 efectuados pelo LNEC e outros 3 pela DGSH. Até 1967 pode dizer-se que o estudo dos assoreamentos foi muito incipiente. Em 1967 foi elaborado um plano de trabalhos em que até certo ponto se previa uma mudança de orientação a imprimir ao estudo sistemático que se pode caracterizar por uma maior preocupação na medição do transporte sólido dos rios portugueses e um abandono na medição das erosões a jusante de descarregadores.

Perante este breve resumo da evolução do processo de estudo poder-se-á concluir que não tem havido efectivamente qualquer estudo sistemático do assoreamento das albufeiras. Supõe-se que a não efectivação do tal estudo se deve a uma série de factores dependente de várias entidades. Por um lado o LNEC debateu-se com a falta de pessoal disponível para o estudo ou, o que praticamente é o mesmo, optou por outros estudos considerados prioritários. Inicialmente previu-se que o LNEC efectuaria também os levantamentos do fundo das albufeiras. No entanto a partir de 1962 os levantamentos passaram a ser efectuados pela DGSH. Por outro lado esta entidade assim como outras entidades que poderão colaborar não tem tido oportunidade, também devido a problemas de pessoal, de constituir uma equipa com o material adequado aos citados levantamentos. Sendo assim julga-se que a efectivação do estudo sistemático

do assoreamento das albufeiras não avançou nem no aspecto teórico nem no aspecto prático. De qualquer modo o avanço destes dois aspectos deve ser paralelo porque cada um dos aspectos tomados isoladamente não conduz a resultados com interesse. Conclui-se pois que se se quizer realmente empreender tal estudo sistemático de modo a obter um conhecimento minimamente utilizável pelos vários organismos ligados à exploração ou ao projecto das albufeiras terá de ser feito um esforço para se demarcarem bem quais as actividades necessárias para atingir tal fim.

Como um contributo deste relatório para o avanço no aspecto teórico procura-se desenvolver algumas considerações gerais que poderão perspectivar o trabalho prático a efectuar o qual parece ser o passo seguinte sem o qual não se poderá colher resultados significativos. De facto o problema dos assoreamentos poder-se-á pôr, com certa gravidade, nalgumas albufeiras, dentro de um futuro mais ou menos próximo assumindo particular interesse em relação às albufeiras do plano de Rega do Alentejo.

Com o presente relatório, pretende-se fazer uma primeira análise do fenómeno servindo de ponto de partida para o seu estudo mais aprofundado e tendo como consequência um programa de acção que permita propôr soluções práticas, impedindo ou atenuando os prováveis efeitos do assoreamento na exploração de aproveitamentos hidráulicos.

A procura de soluções práticas deve partir do conhecimento da situação actual das albufeiras, quer por métodos de observação directos, quer por aproveitamento racional dos dados já existentes, e tem por objectivo o estabelecimento de critérios de previsão dos assoreamentos e consequentemente de normas de projecto e exploração das albufeiras existentes ou a construir. Evidentemente que, na fixação de critérios de controle de sedimentação, tem de atender-se não só à eficiência dos métodos utilizados mas também aos aspectos económico e financeiro que os condicionam em larga medida.

No capítulo 2 faz-se uma descrição qualitativa do assoreamento das albu

feiras, analisando os fenómenos sedimentares que neles ocorrem.

Neste capítulo chama-se a atenção para o facto do assoreamento das albufeiras ser um caso particular do fenómeno sedimentar mais geral. São ainda apresentadas várias relações e valores quantitativos para se sentir a ordem de grandeza dos vários parâmetros intervenientes nos fenómenos.

No capítulo 3 referem-se as técnicas de observação dos assoreamentos das albufeiras, explicitando-se os modos de obtenção de parâmetros com interesse para o estudo dos assoreamentos. Faz-se a distinção entre as observações dos fenómenos no seu aspecto dinâmico, isto é, do mecanismo da sedimentação e as observações do efeito desse mecanismo, o assoreamento, dando a estas últimas a designação genérica de levantamentos. Estes são por sua vez subdivididos em levantamentos topo-hidrográficos, que permitem conhecer a configuração da superfície dos depósitos, e em levantamentos sedimentológicos que caracterizam as propriedades físicas e químicas dos sedimentos depositados.

No capítulo 4 comentando-se a utilização de modelos no estudo do assoreamento das albufeiras, procura-se mostrar as potencialidades tanto dos métodos ditos experimentais como métodos analíticos na resolução dos problemas postos pelos assoreamentos das albufeiras, quer em estudos globais, quer em estudos parciais. Referem-se os modelos que prevêm o transporte sólido afluente à albufeira e os que simulam os fenómenos ocorridos dentro das mesmas. Nos métodos experimentais incluem-se os modelos físicos, hidráulicos ou aerodinâmicos, ou experiências em protótipos enquanto nos métodos analíticos se utilizam equações que simulam os fenómenos para cujo tratamento se tira partido dos meios automáticos de cálculo.

No capítulo 5 é tratado o controle do assoreamento das albufeiras, descrevendo-se os métodos que tem sido utilizado para atenuar os seus efeitos na exploração dos aproveitamentos, e faz-se notar a necessidade de se aplicar uma metodologia própria na fase de projecto que atenda aos problemas da sedimentação tratados nos capítulos anteriores, de modo a conseguir-se uma exploração racional e eficaz do aproveitamento.

Por último no capítulo 6 tecem-se algumas considerações finais, aplicando

-se ao caso das albufeiras portuguesas algumas conclusões a que se chegou em resultado do estudo empreendido. Propõe-se um programa dos trabalhos que se julga serem essenciais para um estudo sistemático dos assoreamentos das albufeiras portuguesas.

2 - DESCRIÇÃO QUALITATIVA DO ASSOREAMENTO DAS ALBUFEIRAS

2.1 - Introdução. Erosão, transporte e deposição dos sedimentos

No ciclo hidrológico os escoamentos sobre a superfície terrestre formam sistemas fluviais apresentando, em geral, características diversas, ora com regime permanente, ora com regime intermitente. Estes sistemas fluviais podem estar em equilíbrio, isto é, com as linhas de água bem definidas oscilando ligeiramente em torno de uma situação média ou, pelo contrário, podem sofrer modificações graduais, quer por fenómenos de meandrização, quer por elevação ou abaixamento dos leitos, quer ainda por outras formas. A água no seu escoamento superficial em direcção às linhas de talvégue escoam-se pelos terrenos com velocidades que podem ser maiores ou menores consoante a intensidade de precipitação, a inclinação das vertentes e a natureza da superfície destas. Quer se escoem pelas linhas de água quer pelas superfícies naturais do terreno, a água apresenta-se carregada de materiais que foram erodidos nuns locais e que se irão depositar noutros.

A acção de erosão, de transporte e de deposição de vários materiais pela água processa-se numa unidade natural chamada bacia hidrográfica que pode ser definida, como "uma depressão, circundada por um conjunto de relevos mais altos, e mais ou menos montanhosos, drenada por uma rede de linhas de água afluente a uma linha de água principal, que pode ser o mar, um rio, uma ribeira, uma torrente, etc" ZBYSZEWSKI 1965.

Todos os aspectos morfológicos, hidrográficos, geográficos, pedológicos, biológicos da bacia hidrográfica são importantes tanto no estudo do escoamento líquido como no estudo do escoamento sólido.

Em todas as bacias hidrográficas actuam vários agentes climáticos que me

cânica ou quimicamente provocam a erosão, embora a sua importância relativa seja variável com o clima. A figura 2.1, LEOPOLD et al. 1964, apresenta a influência relativa de factores climáticos que provocam a erosão, como sejam o balanço hídrico, a temperatura, o vento, etc, em diagramas tendo por abcissa a precipitação anual média e por ordenada a temperatura média anual (grandes que podem caracterizar grosseiramente vários tipos de clima).

Nesta figura os dois primeiros diagramas fazem uma exemplificação e classificação simples dos vários climas em função da precipitação e de temperatura anual média. Os restantes diagramas fornecem uma análise elementar da influência dos diferentes climas na intensidade de cada um dos diferentes processos erosivos (por acções mecânicas, acções químicas, acção do vento, acção do gelo e degelo e acção do balanço hidrológico).

Como síntese dos processos de erosão da superfície de uma bacia hidrográfica apresenta-se uma tabela devida a STRAHLER (Quadro 2.1). Tal síntese é o resultado da observação da natureza, observação que tem muito de qualitativo e pouco de quantitativo, devido a dificuldades na medição de velocidades das transformações ocorridas; essas dificuldades resultam ou dos ritmos extremamente baixos que se verificam ou do facto de os fenómenos se darem em locais quase inacessíveis a medições.

No entanto, apesar de escassas, existem estimativas de erosão, resultantes de medições directas ou obtidas indirectamente.

MENARD 1961 e CORBEL 1959, apresentam os valores do quadro 2.2 e do quadro 2.3. Além destas estimativas muito gerais existem os valores que muitas vezes são obtidos em levantamentos de albufeiras ou na medição de caudal sólido em rios (ver por exemplo os quadros. 2.4 e 2.6 a 2.9 nas colunas de erosão específica).

Os sedimentos originados pelos processos erosivos, nas rochas e nos solos, são removidos dos locais de origem e transportados pela água ou pelo ar, geralmente para regiões de menor altitude da bacia hidrográfica.

Os sedimentos são transportados pela água principalmente de duas maneiras, por arrastamento e em suspensão. No transporte por arrastamento as partículas movem-se no leito do rio por forma interminente. Devido à descontinuidade do movimento e à natureza do fenómeno de transporte as partículas têm uma velocidade média menor do que a do escoamento. Na outra modalidade do transporte, a suspensão das partículas resulta da turbulência do escoamento distribuindo-se estas em toda a secção transversal com concentrações em geral decrescente do fundo para a superfície.

O caudal sólido em suspensão pode ser superior ao caudal sólido por arrastamento, deslocando-se as partículas com uma velocidade semelhante à da água.

As modalidades de transporte sólido tem sido estudadas quantitativamente em escoamentos bidimensionais. Na natureza o escoamento é geralmente tridimensional e a partícula pode deslocar-se em qualquer direcção o que aumenta a dificuldade de estabelecer leis de transporte.

Duma maneira geral os estudos feitos envolvem casos em que as forças actuantes são mecânicas, só interessando a densidade, forma e dimensão da partícula. Porém, à medida que diminuem as dimensões das partículas, aumenta a importância, no seu deslocamento, das forças químicas (moleculares). Neste caso o estudo do transporte é mais complexo.

O transporte sólido varia numa mesma secção, com o tempo, e num mesmo instante com o local. Por um lado sabe-se que o caudal sólido é dependente do caudal líquido; por outro lado um mesmo caudal líquido pode transportar maior ou menor material sólido consoante a quantidade de sedimentos disponível na bacia hidrográfica e no leito do curso de água. É patente assim a grande variabilidade que o valor de transporte sólido pode assumir. Os factores climáticos que condicionam a precipitação são muito variáveis. Assim a precipitação flutua muito em torno de um valor médio, e do mesmo modo o

caudal líquido; por consequência, o caudal sólido acaba por ser mais variável do que as grandezas anteriores devido a uma sobreposição de variações aleatórias.

Devido à grande variabilidade dos fenómenos em jogo, todo o estudo hidrológico é eminentemente estatístico, obrigando a recorrer a conceitos de frequência, intervalo de recorrência, valor médio, etc.

Para dar ideia dos valores de transporte sólido encontrados na natureza e da sua grande variabilidade, apresentam-se no quadro 2.4 alguns dados obtidos em várias regiões do mundo.

Duma maneira geral podem considerar-se num rio, uma zona de erosão, uma zona de transporte e uma zona de sedimentação, não implicando isto que na zona de erosão não haja troços localizados onde se dê uma deposição e vice-versa.

Assim num rio há zonas em que, por haver ainda disponibilidade de capacidade de transporte, se dá absorção de sedimentos pelo escoamento, provenientes da erosão das margens e do leito do rio. Em certas zonas pelo contrário, há deposições até se atingir um equilíbrio entre a capacidade de transporte e a disponibilidade de material sólido. Ainda em outras zonas em equilíbrio o escoamento efectua-se sem aquisição ou perda do material sólido.

A deposição das partículas transportadas por arrastamento resulta do facto do escoamento líquido não ter energia suficiente para ocasionar posterior movimento das partículas.

Esta é uma deposição relativa, pois pode uma partícula estar parada durante um tempo mais ou menos longo e depois mover-se devido à ocorrência de um escoamento com maior energia.

Geralmente, a energia de transporte, da qual são indicativos a velocidade e a profundidade do escoamento e a inclinação longitudinal do leito, diminui num rio de montante para jusante. Assim, também varia a capacidade de transporte por arrastamento e naturalmente as partículas mais pesadas (ou se

ja, as maiores porque o peso específico varia muito pouco) são mais cedo depositadas definitivamente.

As partículas em suspensão, por serem mais finas e requererem menor energia para o seu movimento, depositam-se mais a jusante, dando origem a um leito com partículas mais finas.

As partículas ainda mais finas não chegam a depositar-se mantendo-se em suspensão até à foz do rio.

A partícula em suspensão deposita-se quando a força da gravidade é maior do que a força ascendente devida à turbulência. Este modo de deposição está bem estudado, tendo-se deduzido leis de deposição válidas para partículas inertes e dentro de determinada gama de dimensões, WILMS e SNEL 1971.

Quando a partícula é muito pequena e reage quimicamente com a água, aquelas leis de sedimentação já não são válidas, havendo portanto necessidade de se estabelecerem novas leis, PARTHENIADES 1971.

Como resultado da variabilidade do regime de escoamento num determinado troço do rio, há deposição em determinadas ocasiões enquanto noutras ocasiões há erosão. Medições feitas em rios mostram que numa dada secção se verificam erosões durante as cheias, tomando o fundo uma forma análoga à primitiva quando o nível de água retoma o valor anterior à cheia.

Existe assim uma mobilidade do leito. Esta mobilidade pode consistir em flutuações em torno da média na forma e dimensões das secções transversais, mantendo-se estas semelhantes ao fim do determinado tempo o que denota um certo equilíbrio dinâmico. Noutros casos, quando por qualquer motivo não se verifica esse equilíbrio, vai-se dando uma lenta ou rápida transformação do leito.

Quando se constroi uma barragem ocorrem quase sempre modificações do regime de caudais a jusante da barragem, do transporte sólido, quer a jusante quer a montante da mesma e por consequência também se modifica o leito do rio.

A modificação do regime de caudais é em geral propositadamente desejada e razão de ser da construção, diminuindo os caudais elevados e aumentando os caudais baixos.

Todavia, as outras modificações são indesejadas e causam os danos que foram mencionados em 1.1.

As modificações do transporte sólido provocam em geral assoreamento a montante da barragem e erosões localizadas e generalizadas a jusante da mesma.

É difícil uma descrição quantitativa de todos os fenómenos que se passam durante o processo do assoreamento, quer porque ainda não se compreendem em toda a sua importância, todos os parâmetros que intervêm no fenómeno, quer porque mesmo que se tenham algumas hipóteses sobre o mecanismo da sedimentação ainda não foi possível comprová-las seguramente por meio de observações e medições na natureza. A existência de modelos de assoreamentos de albufeiras permite uma comprovação grosseira, mas, como aqueles modelos se baseiam em simplificações de uma realidade mais complexa, só a constatação dos mecanismos nos protótipos poderá garantir a fidelidade dos modelos.

Atendendo às considerações acima escritas apresenta-se em seguida uma descrição meramente qualitativa dos fenómenos de assoreamento das albufeiras, de quando em quando ajudada por relações, muito simples, entre algumas grandezas.

2.2 - Alteração do regime de erosão, transporte e deposição dos sedimentos provocada pela construção de barragens

De uma maneira geral pode dizer-se que a construção de uma barragem não altera praticamente o processo erosivo da bacia hidrográfica tendo apenas influência na erosão de maior ou menor extensão do leito do rio situado quer a montante quer a jusante da barragem. Mesmo que haja uma alteração do clima, provocada pela existência da albufeira, esta será suficientemente pequena para que não modifique consideravelmente a quantidade de material sólido erodi-

do na superfície da bacia hidrográfica.

De modo semelhante o material sólido transportado não é grandemente influenciado por esta existência até à secção do rio que começa a sentir o efeito da existência da barragem. A jusante dessa secção, que pode ser variável com o nível de água na albufeira, existem alterações do transporte sólido, primeiramente ligeiras, tornando-se mais importantes à medida que se caminha de montante para jusante.

A deposição no entanto sofre profundas modificações na zona da albufeira.

A interposição duma barragem no rio começa por deter o escoamento e o material sólido transportado. À medida que o tempo decorre, o nível de água armazenada sobe. Existe pois um regime referente a este escoamento gradualmente variado, em que a montante o escoamento pode ser lento ou rápido e a jusante há um nível imposto pela barragem.

Na secção onde esta foi construída a velocidade é nula, enquanto que inicialmente havia uma determinada velocidade. Considerando o caudal Q , este é expresso por

$$Q = VS \quad (2.13)$$

sendo

V - Velocidade média do escoamento

S - Área molhada da secção considerada, ambas antes da existência da barragem.

Posteriormente com a existência da barragem, V tende para zero, o que implica que S vai aumentando para um valor muito maior do que o inicial.

Pela análise das fórmulas de transporte sólido verifica-se que uma diminuição da velocidade do escoamento terá como consequência uma diminuição da capacidade de transporte sólido, pelo que, mantendo-se constante a alimentação em material sólido, este material, não sendo transportado, é depositado

em lugares onde anteriormente à existência da barragem isso não acontecia.

Tem-se pois que a modificação dum rio com a construção de uma barragem consiste em mudanças das características hidráulicas e de transporte sólido.

Na fase de enchimento da albufeira não existe qualquer escoamento para jusante da barragem. Mas na fase de exploração, quer o aproveitamento se destine a rega, para a produção de energia, para o controle de cheias, ou para qualquer outra finalidade, é permitido o escoamento do caudal conveniente ao fim em vista. Nesta fase aparecem pois novas condições de escoamento que vão condicionar as características hidráulicas e por consequência as de transporte sólido. Estes escoamentos controlados são efectuados através de orgaos de descarga que podem estar situados à superfície ou perto do fundo, ou através de orgãos de captação que desviam a água para canais ou túneis.

Tem-se assim que o caudal descarregado é

$$Q_d = V_d S_d \quad (2.14)$$

em que

S_d - Área da secção de descarga

V_d - Velocidade média do escoamento descarregado.

Geralmente, os caudais descarregados não são expressos nestas formas mas sim na forma

$$Q_d = k f (H) \quad (2.15)$$

em que

k - Coeficiente de vazão, que depende do tipo de descarregador

H - Carga.

Estas cargas têm assim influência nas novas condições de transporte havendo ainda muito a investigar neste assunto.

A variação do caudal de descarga implica uma variação dos níveis da al-

bufeira e por consequência variações na velocidade de escoamento e no caudal sólido. Tanto na fase de enchimento como na fase de exploração as variações do regime de escoamento, dão-se lentamente. O regime de velocidades varia lentamente assim como as características do transporte sólido. A variação do transporte sólido implica por último uma modificação do leito do rio.

Como as transformações são lentas e geralmente submersas, compreende-se pois a dificuldade de se apreender simplesmente à vista o grau das transformações sofridas pelo fundo da albufeira.

Na região de montante na albufeira, onde as características do escoamento ainda se podem considerar semelhantes às que existiam antes da construção da barragem, embora haja diminuição da capacidade de transporte por haver ligeira diminuição da velocidade do escoamento os fenómenos mantêm-se semelhantes aos pré-existentes.

À medida que se caminha para jusante, as secções tornam-se maiores, sendo cada vez maior a diferença entre o regime actual e o anterior.

Devido à diminuição da capacidade de transporte, os sedimentos acabam por se depositar definitivamente, dando origem a depósitos que vão alterar as características hidráulicas do escoamento além de diminuírem a capacidade da albufeira.

Assim as características hidráulicas e por consequência as de transporte sólido vão-se modificando, aparecendo fenómenos que não se davam nos rios, como por exemplo uma marcada estratificação da água da albufeira, a ocorrência de correntes estratificadas (também chamadas de densidade) e a floculação dos sedimentos finos.

Se esta mudança de regime de escoamento vem introduzir novas complexidades, com a variabilidade dos níveis da albufeira resultantes da exploração as dificuldades aumentam na medida em que passam a ser em maior número os parâmetros necessários para definir o fenómeno da sedimentação.

A maneira como um rio aflui a uma albufeira depende muito da orografia do local que condiciona a forma daquela. A albufeira pode ser estreita e alongada, pode ser arredondada ou apresentar vários braços com rios afluentes. Em cada uma destas formas, a entrada do rio, ou rios na albufeira apresenta características próprias que dão origem a diferentes formas de deposição.

A água afluyente apresenta uma determinada concentração de material sólido e arrasta determinado caudal sólido. Ao entrar na albufeira a profundidade do escoamento começa a variar rapidamente ao longo do rio, e que é acompanhado por uma determinada diminuição da velocidade do escoamento.

O modo como varia a profundidade de água, e portanto a velocidade de escoamento, depende da orografia da albufeira.

Para albufeiras encaixadas e alongadas a variação rápida da profundidade da água resulta principalmente da inclinação do leito visto que a largura varia gradualmente; para este tipo de albufeira a diminuição de velocidade média dá-se em quase toda a largura do escoamento. Com a diminuição de velocidade, as partículas arrastadas e as suspensas perto do fundo depositam-se. De modo geral, de montante para jusante as partículas depositadas são cada vez mais finas. Os depósitos vão ficando assim escalonados ao longo do leito natural inicial.

Na fase de enchimento, à medida que o nível da albufeira sobe a influência da barragem caminha para montante, os sedimentos grossos vão sendo depositados mais para montante, e para jusante verifica-se que numa mesma vertical os sucessivos depósitos vão sendo constituídos por material de menor dimensão.

Depois de atingir o nível máximo da albufeira, todo o escoamento subsequente dá origem a deposições dos sedimentos com as características mencionadas, isto é, partículas tanto mais finas quanto mais próxima da barragem se encontra a secção considerada.

Com a continuação da deposição, os depósitos grosseiros vão avançando des de uma posição inicial até atingirem a barragem. Neste avanço os depósitos grosseiros depositam-se sobre depósitos mais finos.

BONDURANT 1959, apresenta um esquema dos depósitos deste tipo (Fig. 2.2) em que é evidente o modo de avanço dos depósitos de granulometria grosseira.

Quando há variação dos níveis da água na albufeira, as zonas de deposição dos sedimentos de distintas dimensões variam. Assim, na realidade, a distribuição do depósito não é tão simples como a que está descrita havendo antes uma interpenetração de camadas de sedimentos refletindo as variações do nível da água na albufeira, o que dificulta a interpretação das variações de granulometria dos depósitos.

Com a continuação do avanço da frente dos depósitos grosseiros, pode dar-se o enchimento completo da albufeira se decorrer tempo suficiente.

Em tudo o que se disse, partiu-se da suposição de que havia sedimentos grosseiros e finos. Na realidade pode haver casos em que só há sedimentos duma determinada gama de dimensões, e portanto pode não se verificar uma diferença nítida de camadas. No entanto quando existem apenas sedimentos finos, se houver tempo suficiente, a albufeira pode ficar completamente assoreada sem haver avanço numa frente de sedimentos, mas sim acumulação em camadas sobrepostas.

Se a albufeira é larga a formação dos depósitos é diferente. Neste caso o escoamento afluente sofre um alargamento brusco acompanhado ou não de amentô de profundidade. Devido a essa expansão, forma-se zonas de circulação onde a velocidade é pequena.

Os sedimentos não se depositam a toda a largura como no caso anterior, mas formam um banco que penetra pela albufeira dentro. Com as variações do nível da água na albufeira, esse banco sofre transformações, deixando de ser rectilíneo, para se dispersar em posições e ocasiões que "a priori" não são conhecidas. Por fim acaba por formar um delta.

Esquemáticamente pode representar-se como na Fig. 2.3 o avanço dos sedimentos grosseiros depositados nas albufeiras largas.

Entre estes dois tipos descritos da deposição na parte superior da albufeira, há toda uma série de variantes consoante a forma dessa albufeira, as flutuações do seu nível e a composição granulométrica do material sólido transportado pelo rio afluente.

O conhecimento destas várias formas de deposição apresentadas, assim como a compreensão das referidas causas permitirá pois prever o que vai acontecer quando da construção duma nova barragem.

2.3 - Deposição dos sedimentos finos no interior da albufeira

2.3.1 - Generalidades

A água que entra na albufeira perde os seus sedimentos mais grosseiros na parte mais a montante daquela.

Se o caudal sólido é pequeno, vão-se depositando, ao longo da albufeira os restantes sedimentos, podendo acontecer que a certa altura seja praticamente nula a quantidade do material sólido em suspensão. À medida que aumenta o caudal sólido afluente, maior será a distância que as partículas finas atingem. O modo como esses sedimentos são transportados e depositados depende de vários factores hidráulicos e sedimentológicos que se tornam difíceis de detectar em cada caso particular.

Para abordar o problema da deposição de sedimentos finos é necessário primeiramente obter um grande número de dados por observações directas das grandezas com importância no fenómeno. Em princípio, estes dados obtêm-se de modo semelhante ao que se utiliza nos rios, mas com a agravante de se tratar de grandes secções em que não existe a uniformidade de escoamento que se pode obter nos rios, mediante uma escolha criteriosa das secções de medição.

Sendo assim, a não uniformidade do escoamento implica um grande número

de medições em cada secção para se obterem dados suficientes à percepção dos fenómenos.

Entretanto, quer por intermédio de medições feitas, quer com base em experiências laboratoriais e em hipóteses, podem conceber-se algumas teorias que expliquem a sedimentação das partículas finas nas albufeiras. A compreensão da formação das correntes de densidade ou (estratificadas), da sua evolução e da sua eliminação é fundamental para se perceber a deposição das partículas finas e a evolução do fundo da albufeira.

Os materiais sólidos transportados pelas correntes de densidade são predominantemente os siltes e as argilas. As areias, devido ao seu maior peso, depositam por gravidade sem formação de correntes de densidade. É pois na compreensão da deposição das argilas e siltes que as correntes de densidade são importantes (DUQUENNOIS 1955).

2.3.2 - Correntes de densidade

2.3.2.1 - Generalidades

Uma corrente de densidade é um escoamento de um líquido no seio de outro líquido de densidade diferente. No caso particular das albufeiras, o líquido afluyente apresenta maior densidade do que aquele em que penetra devido ao elevado teor em material sólido transportado. As correntes de densidade dependem das características quer do escoamento afluyente quer da água que o recebe.

As diversas características que o rio afluyente pode apresentar dependem das variações hidrológicas do sistema fluvial, encontrando-se por vezes grandes caudais sólidos, outras vezes reduzido ou nulo transporte sólido, havendo assim ocasiões em que a densidade da água escoada é mais elevada que normalmente quando a concentração do material sólido for substancial. Ainda há que contar com as variações da temperatura que condicionam as constantes físicas da água que podem por si só conferir ao escoamento maior ou menor den-

sidade além de influir na capacidade de transporte sólido.

Por sua vez, a água da albufeira encontra-se quase imóvel, o que favorece a estratificação devida aos diferentes pesos específicos resultantes de diferentes temperaturas que se formam nas trocas de calor entre a massa da água, os terrenos da albufeira, a barragem e a atmosfera.

A existência destas condições: massa de água quase imóvel na albufeira e o rio afluente, em determinadas circunstâncias, dá origem a correntes de densidade.

As correntes não se formam exclusivamente nas albufeiras existindo também em situações análogas como por exemplo nos estuários, onde há interpenetração de escoamentos de águas de densidade diferentes, a do mar, salgada e mais densa, e a água doce do rio menos densa.

A formação das correntes de densidade nas albufeiras dá-se principalmente nas cheias, porque é nesta altura que ocorrem as pontas dos caudais sólidos e portanto os escoamentos apresentam maiores densidades aliadas a maiores velocidades, podendo transportar os materiais finos até à barragem, mesmo se o comprimento da albufeira for apreciável.

Segundo DUQUENNOIS 1955, o estudo das correntes de densidade deve focar os seguintes aspectos:

- comportamento das suspensões
- chegada das águas turvas a uma albufeira
- propagação da corrente de densidade de fundo
- correntes de densidade intermédias
- regolfo da densidade - sedimentação - evacuações (descargas)
- energia de transporte.

A aplicação deste estudo no controle do assoreamento será analisado em

5.

2.3.2.2 - Formação das correntes de densidade

O rio ao afluir à albufeira transporta material sólido em suspensão; escoando caudais líquido e sólido com determinadas distribuições de velocidades e de concentrações.

A água da albufeira encontra-se também com determinadas características de concentração de material sólido e de distribuição dos valores da temperatura.

À afluência do escoamento segue-se a interpenetração dos dois líquidos (Fig. 2.4).

Se estes dois líquidos estão nas mesmas condições de temperatura e com uma distribuição uniforme de concentração, dá-se uma perda de carga no escoamento, devido à difusão que este sofre tanto maior quanto mais brusca for a variação quer da profundidade do escoamento quer da largura.

Quando a massa líquida está estratificada, devido a uma distribuição da concentração do material acompanhada de gradientes de temperatura, o escoamento afluyente não penetra no seio da massa líquida da albufeira como no caso em que existia homogeneidade. Agora a penetração efectua-se de modo a que seja mantida a estratificação pré-existente. O escoamento afluyente tem tendência a formar um novo estrato.

Para afluências com densidades maiores das que existem na albufeira, o escoamento afluyente tende a afundar, dando origem àquilo que DUQUENNOIS 1955, chama corrente de densidade de fundo.

Quando a densidade do escoamento afluyente é menor do que a da camada mais densa da albufeira, a penetração efectua-se não pelo fundo mais numa posição intermédia, a que DUQUENNOIS chama corrente de densidade intermédia.

A estratificação numa albufeira depende, num determinado instante da sua história e em geral varia sazonalmente devido às variações climáticas com ciclo

anual. Por sua vez a afluência de escoamentos do rio vai influenciar a história da estratificação da albufeira. Tem-se assim uma interdependência de causas e efeitos que se sucedem, tornando-se difícil prever a médio e a longo prazo a formação de correntes de densidade. Dificuldade acrescida com a necessidade do conhecimento hidrológico e sedimentológico da bacia como ponto de partida do conhecimento dos caudais afluentes.

Ora o regime de caudais afluentes é caracterizado por flutuações dos seus valores. Quando se atinge o máximo caudal líquido, também se atinge, embora desfasado no tempo, o máximo caudal sólido para aquela cheia. É portanto nas ocasiões de cheia que se podem formar as correntes de densidades de fundo, que são também as que envolvem maior energia de transporte e maiores quantidades de sedimentos.

Quando os caudais são menores, há tendência para a formação de correntes intermédias.

2.3.2.3 - Propagação e eliminação das correntes de densidade

Depois de formada a corrente de densidade, a sua propagação depende da energia de que ela vem animada.

Segundo DUQUENNOIS 1955, a energia da corrente de densidade por unidade de largura do leito, e , é expressa por

$$e = \Phi (q, (d-1), I) \quad (2.18)$$

onde

q - Caudal líquido por unidade de largura do rio afluente

d - Densidade da água afluente, tomando como referência a água da albufeira

I - Inclinação do fundo da albufeira

Para maiores valores de q , d ou I maior é a energia de transporte e os sedimentos depositam mais perto da barragem. Fazendo variar estes parâmetros,

faz-se variar as condições de transporte e portanto o lugar de deposição dos sedimentos, que deixam de poder ser transportados pela corrente de densidade. Tudo o que diminuir a energia inicial, facilita a deposição dos sedimentos na parte de montante da albufeira, enquanto que o que fizer aumentar e permite uma deposição mais perto da barragem. O aumento de largura do rio afluente, a redução da inclinação, a maior rugosidade do leito, uma curva etc., dão origem a deposições. Pelo contrário, um aumento da inclinação, a erosão das partículas do leito, etc., fazem aumentar a energia da corrente e permitem um maior percurso desta.

Se se podem conceber estas hipóteses, é no entanto difícil detectar os parâmetros em jogo para casos em que esta corrente de densidade é bem definida, isto é, quando há um bom contraste entre água afluente e água armazenada. Quando não existe este contraste nítido e as densidades são semelhantes ainda é mais difícil detectar e medir a corrente de densidade.

DUQUENNOIS mediu em Iril-Emda, Argélia, a velocidade de 0,7 e 2,8 m/s para as correntes de densidade de fundo, valores que achou altos, para o que esperava encontrar a partir de considerações teóricas. Para explicar estes valores altos põe a hipótese de haver uma reação em cadeia em que a corrente de densidade, ao erodir o fundo da albufeira, aumenta a sua densidade dando origem a uma corrente de densidade com maior energia, o que implica uma velocidade maior. Só posteriores medições podem confirmar estas ou outras hipóteses possíveis.

Os processos de eliminação das correntes de densidade são de difícil análise, pelo grande número de parâmetros em jogo. Sem o apoio de valores medidos quer na natureza quer em modelos construídos em laboratório, apenas é possível a enumeração de hipóteses razoáveis para os vários modos de eliminação das correntes de densidade.

Na zona de formação das correntes de densidade de fundo, a água turva que forma a corrente é bem diferenciada da água clara da albufeira por intermédio

duma "interface".

À medida que a corrente se introduz na albufeira, há uma diluição que implica num aumento da espessura da interface. Por outro lado a diluição faz diminuir a densidade da água turva o que provoca uma maior dificuldade em o escoamento vencer a resistência do fundo da albufeira e a resistência da água na interface.

DUQUENNOIS, 1955 supõe haver um mesmo valor da rugosidade do fundo tanto para o escoamento com superfície livre como para os escoamentos das correntes de densidade, mas as resistências na interface são mal conhecidas.

Quando a corrente de densidade não se escoia pelo fundo da albufeira, mas sim numa posição intermédia, por estar animada por uma energia menor, tem tendência a ser eliminada mais rapidamente do que aquela que vai pelo fundo. Além disto, nesta corrente intermédia existe uma perda de partículas por deposição. Esta perda origina uma diminuição da densidade da corrente, apressando a sua eliminação.

A observação das correntes de densidade é tratada em 3.1.

Como exemplo de valores de turvação atingidos pela água das correntes de densidade apresentam-se resultados das medições de CHAMOV 1959.

Profundidade sob a superfície da água Turvação

2 m	108 g/m ³
4 m	161
6 m	168

Na Fig. 2.5 apresentam-se os gráficos obtidos em Iril-Emda, na Argélia, com os valores das densidades da água a montante das comportas e a sua evolução no tempo onde, através da análise da variação da densidade com o número de comportas abertas, se percebe a importância do número de comportas de des

carga na regulação de densidade da água, DUQUENNOIS, 1955 (ver 2.3.3)

As partículas transportadas pelas correntes, (siltes e argilas), podem depositar de vários modos consoante as características físicas e químicas da água em que se encontram. Estas partículas, principalmente as argilas, não são inertes, tendo a capacidade de trocar iões com os sais dissolvidos na água, resultando daí forças electroquímicas, que se somam às forças mecânicas das partículas mergulhadas num fluido. Assim as partículas podem apresentar tendência para se afastarem umas das outras, ou seja para se dispersarem, ou pelo contrário tendem a unir-se, juntando-se em grupos ou flóculos.

Enquanto que as partículas dispersas dificilmente se depositam, as que flocculam fazem-no rapidamente.

Portanto ao pouco conhecimento que há das correntes de densidade, há a juntar a necessidade de maior compreensão das características químicas da água que recebe as correntes, para se ajuizar da distribuição da sedimentação do material sólido afluente à albufeira. Não basta pois conhecer a granulometria deste material afluente, pois para uma mesma percentagem de finos de determinadas dimensões, pode acontecer que, para águas armazenadas de diferentes composições químicas, se dêem sedimentações a maiores ou menores distâncias da barragem.

Apesar de haver uma tendência para as partículas mais finas se depositarem próximo da barragem, como variam os factores que influenciam a deposição, não se pode esperar encontrar uma homogeneidade de distribuição espacial das mesmas, podendo acontecer até que essas partículas finas se depositam muito próximo das partículas mais grossas.

2.3.3 - Efeito das descargas de fundo e de superfície sobre as correntes de densidade

Na ausência de qualquer escoamento para jusante da barragem, todo o material sólido afluente é retido. Assim na parte de montante depositam-se os se

dimentos grosseiros, enquanto os finos penetram mais para o interior da albufeira. A partir de uma certa ocasião todo o fundo da albufeira é coberto por sedimentos, que tendem a regularizar e planificar esse mesmo fundo, sendo as correntes de densidade de fundo facilitadas devido a uma menor rugosidade do leito.

Quando há escoamento para jusante da barragem, os fenómenos que se passam a montante sofrem modificações em relação àqueles que se dão quando há uma retenção total.

Primeiramente deve-se fazer a distinção de dois tipos de descarga: defundo e de superfície. A diferença do material sólido transportado pelos dois processos é nítida. Enquanto na descarga de superfície é evacuada a parte superior do escoamento, geralmente de água clara, na descarga de fundo é escoada a parte inferior que apresenta uma turvação maior.

As descargas de fundo têm pois um papel na evolução dos assoreamentos das albufeiras. Embora sabendo-se que as descargas de fundo são importantes, falta aprofundar em que grau o são em cada caso particular. Para um melhor conhecimento do funcionamento das descargas de fundo, é necessário um maior número de dados observados em albufeiras já existentes, aliado a uma experimentação laboratorial acompanhada duma investigação de base.

Um estudo importante sobre este assunto foi efectuado pela Electricité et Gaz d'Algérie, desde 1937, nas albufeiras argelinas, que sofrem intenso assoreamento de materiais finos. Nesse estudo DUQUENNOIS sintetiza as consequências da abertura não permanente das comportas de descarga de fundo:

- "1) Pequena abertura da comporta - À chegada da corrente de densidade há uma mudança brusca de água clara para água com turvação igual à da frente de onda da mesma. A turvação aumenta progressivamente permanecendo igual à da albufeira ao nível da comporta. O escoamento do material sólido dura muito tempo elevando

-se sempre a densidade, da água, que depois, rapidamente se torna clara. A descarga deu-se pois com concentrações cada vez maiores.

2) Abertura um pouco maior - O caudal descarregado é ainda inferior ao da corrente de densidade e ao princípio o fenómeno é semelhante ao anterior. Seguidamente, as densidades da água escoada são menores que no caso precedente e a densidade do caudal escoado é inferior à densidade do fundo que por sua vez é inferior à densidade do fundo do caso anterior. Se se fechar ligeiramente a comporta, a densidade da água aumenta. Se se abrir um pouco, a densidade da água descarregada diminui. Isto pode explicar-se por no caso de se fechar um pouco a comporta haver uma maior quantidade total de matérias sólidas evacuadas devido a uma movimentação maior das partículas sólidas.

3) Grande abertura da comporta - Quando o caudal descarregado é da ordem do caudal da corrente de densidade, não há praticamente reflexão do material sólido na barragem, havendo uma continuação da corrente de densidade para jusante da barragem. Neste caso é grande a quantidade de matérias sólidas evacuadas, não havendo praticamente deposição no sítio imediatamente a montante da barragem. No entanto o "rendimento sólido/líquido" é muito baixo."

É precisamente este "rendimento sólido/líquido" que tem importância no aproveitamento do escoamento das correntes de densidade, com a finalidade de diminuir a deposição dos materiais finos a montante da barragem, com um mínimo gasto de água. Mas em 5.1 este assunto será tratado quando se falar do controle dos assoreamentos das albufeiras.

2.3.4 - Evolução do fundo da albufeira

O fundo da albufeira é inicialmente formado pelo leito do rio, antes da construção da barragem, e suas margens. Com a subida do nível de água armazenada, o material sólido transportado pela água vai-se depositando. A distribuição e a quantidade de depósitos depende das características morfológicas da albufeira, da qualidade da água aí armazenada, do caudal sólido e do caudal líquido afluente.

Duma maneira geral a dimensão do material depositado decresce da parte montante da albufeira para a secção da barragem, aliás de modo semelhante ao que acontece num rio natural que apresenta uma diminuição da dimensão dos sedimentos dos fundos de montante para jusante. Mas como a variação das condições hidráulicas é muito mais rápida na albufeira, também o é a variação da dimensão da partícula depositada.

A evolução dos depósitos das partículas finas, que decantam mais no interior da albufeira depois de terem sido transportadas pelas correntes de densidade, é, de uma maneira geral, mais rápida do que a evolução dos depósitos de partículas grosseiras.

Neste assunto, também há muitas lacunas de conhecimento. Para aumentar o seu grau é necessário obter mais dados em medições directas dos depósitos, tal qual estão sob a água. A análise dos depósitos a seco é falseada pelas transformações que estes sofrem, quando se retira a água sobrejacente.

Para o estudo do comportamento dos depósitos podem considerar-se dois grandes grupos de sedimentos, os mais grosseiros (em geral inertes) e os mais finos que apresentam maior facilidade em sofrerem transformações de natureza química e de consistência.

A deposição dos sedimentos de maiores dimensões é mais fácil de prever devido a uma menor complexidade das suas leis e ainda porque estes, depois de depositados, têm um comportamento mais estável.

Nos sedimentos mais finos, (siltes e argilas), as leis de deposição são mais complexas e os depósitos apresentam transformações não perfeitamente conhecidas.

Uma propriedade importante dos depósitos argilosos é a tixotropia. O material diz-se tixotrópico quando se comporta como um sólido (gel) no estado de repouso, mas passa a comportar-se como um líquido quando é agitado, sendo esta propriedade irreversível. Sendo assim a água sobrejacente tem uma importância grande no comportamento dos materiais depositados podendo-se acrescentar que a variação da altura de água acima dos depósitos implica uma variação das propriedades destes. Esta propriedade, assim como outras do comportamento dos depósitos, tais como densidade e a porosidade, são estudadas na mecânica dos solos, podendo-se utilizar a sua metodologia, com as modificações que decorrem da existência de uma camada de água superior aos depósitos.

A sobreposição das camadas de sedimentos depositados dá origem a uma pressão das camadas superiores sobre as inferiores. Essa pressão faz com que as camadas inferiores se compactem ou consolidem. Para explicar estes fenômenos podem utilizar-se as leis de consolidação da mecânica dos solos. Num esboço rápido pode dizer-se que à medida que se acumulam os sedimentos, aqueles que se encontram inferiormente vão sofrendo uma compactação devido à expulsão da água que existe nos vazios que separam as partículas sólidas. Como para se dar a expulsão é necessário haver um escoamento em meio poroso conclui-se que a permeabilidade dos depósitos deve ser considerada no estudo da compactação.

A compactação ou consolidação, conseguida à custa da expulsão da água dos vazios, faz com que diferentes volumes dos depósitos, antes e depois da compactação, apresentem a mesma quantidade de material sólido, isto é, há um aumento do seu peso específico. Assim o peso específico dos depósitos pode indicar o seu grau de consolidação.

Como a densidade das partículas constituintes dos depósitos é aproximadamente constante (cerca de 2,65), as diferenças encontradas nas densidades dos depósitos explicam-se pelas diferentes quantidades de vazios que existem nas várias qualidades de depósitos. Uma areia ou outro depósito de material grosseiro apresenta geralmente uma densidade maior do que os depósitos de argilas, porque nestas o índice de vazios é maior.

Nas figuras 2.6 e 2.7, mostram-se as curvas apresentadas por KOELZER e LARA 1958, que exprimem bem o que se acabou de dizer. Isto é a diminuição de vazios com o tempo de actuação de uma carga (Fig. 2.6) ou como aumento da carga (Fig. 2.7).

Além das teorias utilizadas na mecânica dos solos, é necessário considerar as condições em que se dão as transformações. É evidente que o comportamento de depósitos sempre cobertos de água é diferente do comportamento daqueles depósitos que são expostos ao ar durante um certo tempo.

Enquanto nos primeiros existe uma continuidade das condições (embora as flutuações do nível da água na albufeira se reflitam nos valores de carga) os segundos depósitos estão sujeitos a uma descontinuidade do ambiente que se reflete nas características destes. É exemplo frizante deste caso o que se mostra nas fotografias 2.8 e 2.9. Na primeira vê-se a camada superficial do fundo da albufeira de Maranhão a seco, onde se notam fissuras resultantes da secagem. Os blocos de formas poliédricas que aí se mostram, podem ser facilmente deslocados por camadas com uma espessura variável de local para local, e no mesmo local de ano para ano.

Na figura 2.9 mostram-se os blocos deslocados. A facilidade de se deslocarem os blocos poliédricos resulta das diferentes condições em que depositaram os sedimentos ao longo dum ciclo anual. Depois da estiagem, em que o fundo da albufeira na qual se tiram as fotografias fica a seco, com as primeiras precipitações afluem os sedimentos mais grosseiros. À medida que o nível da água

na albufeira sobe, num determinado local, depositam os sedimentos mais finos. Assim há uma camada que ficou a seco e que serve de base para outra camada que se forma durante um ano. Como a quantidade e qualidade dos sedimentos podem variar devido a diferentes regimes pluviométricos, as camadas formadas variam de espessura e de granulometria em cada ano.

KOELZER e LARA 1958 apresentam os valores medidos do peso específico de amostras do mesmo local, colhidas com um dia e com quatro meses de exposição à atmosfera. A primeira tinha o peso específico de $0,77 \text{ tf/m}^3$ e enquanto que a segunda apresentava o valor de $1,55 \text{ tf/m}^3$.

No quadro 2.5 pode ser vista a grande variabilidade dos valores do peso específico dos sedimentos depositados medidos em diversas albufeiras, havendo a lamentar muitas vezes a não interpretação e relação destes valores com parâmetros significativos referentes à albufeira, bacia hidrográfica e material sólido afluente. Em 3.2.3, quando do estudo dos métodos de observação, descreve-se o modo de efectuar um levantamento em que se põe em relevo a possibilidade de correlação dos valores do peso específico medidos com as características da albufeira, tal como a sua forma, com a distância à barragem, etc.

Como exemplo de uma correlação simples pode-se ver a Fig. 2.10, que mostra a relação entre o peso específico dos depósitos e a percentagem da areia existente neles.

A acumulação dos sedimentos diminui a capacidade da albufeira. Para se ter uma ideia do grau de redução que sofre a capacidade, apresenta-se um conjunto de dados obtidos em medições feitas em lugares muito diversos, sem a preocupação de seguir qualquer ordem de importância dos assoreamentos verificados (quadro 2.6 a 2.9).

2.4 - Conclusões

Os sedimentos produzidos ou originados na bacia hidrográfica são trans-

portados para locais com uma cota inferior àquela onde foram produzidos.

Aqueles sedimentos que atingem a albufeira são necessariamente depositados nesta, se a barragem não descarrega nenhum caudal.

Quando há um escoamento através ou sobre a barragem, ou através dos órgãos de descarga não existentes na barragem, juntamente a esse escoamento líquido existe uma descarga do material sólido transportado. Não há contudo a passagem de todo o material sólido que inicialmente era transportado na secção da barragem.

À medida que se caminha de montante para jusante, até à barragem, o material transportado é cada vez mais fino, devido a uma diminuição da capacidade de transporte do escoamento na albufeira.

Na zona mais funda da albufeira, onde as secções atingem valores elevados de área molhada, aparecem fenómenos de estratificação que dão origem à formação de correntes de densidade.

De tudo o que se disse sobre o assoreamento das albufeiras pode pois concluir-se que são os factores seguintes aqueles que apresentam uma maior importância na quantidade anual dos depósitos:

- 1º. - Forma e volume da albufeira
- 2º. - Composição granulométrica dos sedimentos afluentes
- 3º. - Operações de exploração do aproveitamento
- 4º. - Concentração da água afluente

Existirão certamente outros índices que terão uma apreciável correlação com o assoreamento.

Por outro lado os factores que influem nas características apresentadas pelos depósitos são:

- 1º. - Composição granulométrica
- 2º. - Peso da camada superior

3º. - Grau de exposição dos sedimentos

4º. - Permeabilidade dos depósitos

5º. - Tempo ocorrido após a deposição

3 - TÉCNICAS DE OBSERVAÇÃO DOS ASSOREAMENTOS DAS ALBUFEIRAS

3.1 - Observação dos mecanismos da erosão, transporte e sedimentação

3.1.1 - Introdução

A observação mais geral do mecanismo do assoreamento das albufeiras deve englobar observações da erosão, do transporte e da deposição dos sedimentos, em toda a bacia hidrográfica isto é, de todos os fenómenos que influenciam esse assoreamento.

Assim seguidamente analisa-se em particular a observação de cada um dos fenómenos sedimentares.

3.1.2 - Observação do mecanismo da erosão

A produção dos sedimentos não pode ser directamente observada. O fenómeno da erosão que se dá em toda a bacia hidrográfica que alimenta a albufeira origina um ligeiro abaixamento da crusta o qual não é em geral detectável por levantamentos topográficos distanciados no tempo da ordem das dezenas de anos. No entanto se, no conjunto, a apreciação do desgaste sofrido pelo terreno não é, em geral, possível, já em certos locais restritos, aquele desgaste pode ser detectado como, por exemplo, em troços do leito de rios, em que levantamentos periódicos podem revelá-lo. Mas como a maioria do material sólido provém, em geral, das vertentes e não do leito dos rios, não é possível avaliar directamente as quantidades de material perdido pelo terreno.

Os valores das taxas de desnudação apresentados nos quadros 2.2 e 2.3 foram obtidos indirectamente. Nomeadamente, MENARD 1961, avalia a taxa de ero

são a partir do conhecimento da área de origem dos sedimentos, do volume dos depósitos a que essas sedimentos dão origem e do tempo em que durou a erosão, que neste caso é à escala geológica. No caso de uma albufeira, conhecendo-se a área da bacia hidrográfica e o volume dos depósitos e sabendo-se o tempo que medeia entre duas situações observadas, torna-se possível calcular taxas de erosão médias, dividindo o volume dos sedimentos depositados mais o volume dos sedimentos descarregados para jusante da barragem pelo tempo da deposição ou dividindo o volume dos sedimentos depositados pela área da bacia hidrográfica chamando-se às primeiras taxas de desnudação no tempo e às segundas, erosões específicas.

Na posse destes elementos pode, então, tentar-se correlacioná-los com as características geológicas, pedológicas, climáticas, etc. da bacia hidrográfica. Estudando as bacias hidrográficas obtêm-se valores característicos de determinadas regiões naturais que poderão ser utilizados por exemplo nos cálculos expeditos de estimativas de erosões específicas para projectos de aproveitamentos em bacias com características semelhantes.

3.1.3 - Observação do mecanismo do transporte sólido

As técnicas de observação do transporte sólido estão amplamente documentadas, como por exemplo, em BUREAU OF RECLAMATION 1959.

A observação do material transportado é fundamentalmente diferente para o material arrastado e para o material suspenso e dissolvido. Não é, intuito deste trabalho descrever pormenorizadamente as técnicas utilizadas na observação dos dois tipos de transporte sólido, mas sim dar a conhecer a finalidade das várias técnicas existentes para o estudo do assoreamento das albufeiras.

Para o conhecimento do modo de deposição dos sedimentos numa albufeira é necessária a obtenção dos valores de caudais líquidos e sólidos dos rios afluentes a este. Sendo assim, interessa conhecer além do modo de obter estes

valores, saber quais os valores pretendidos, isto é, se médias diárias, se mensais, ou se anuais, etc..

As técnicas habituais de medição de caudais são utilizadas nos rios afluentes. Mas se se pretender analisar com profundidade o transporte sólido no interior da albufeira, utilizar-se-ão essas técnicas habituais adaptadas ao caso concreto das grandes secções da albufeira. Esta adaptação deriva do facto de se encontrarem maiores larguras superficiais, maiores profundidades e principalmente diferentes distribuições de variáveis tanto na vertical como em planos horizontais. Como, geralmente, as albufeiras apresentam morfologias muito diversas, cada uma delas, pode apresentar distribuições particulares das variáveis hidráulicas, que não podem ser facilmente generalizáveis, pelo menos enquanto não se dispuser de observações em número suficiente. Aliás, nos próprios rios, deve-se principiar com uma primeira fase de observação experimental, em que se procura definir as distribuições características; nas albufeiras, devida às dimensões e irregularidades geométricas essa primeira fase terá de ser forçosamente mais demorada para se obter uma precisão semelhante.

Como exemplo de variáveis necessárias para o conhecimento do transporte sólido e escoamento líquido, mencionam-se as que devem ser analisadas quanto às suas distribuições nas secções molhadas tanto da albufeira como dos rios:

- perfil transversal da secção
- velocidade do escoamento
- velocidade de atrito junto ao fundo
- tensão tangencial no fundo
- caudal líquido específico
- caudal sólido específico por arrastamento
- concentração dos sedimentos em suspensão
- caudal sólido específico em suspensão
- velocidade de sedimentação das partículas sólidas

- diâmetro das partículas de várias fracções granulométricas
- temperatura

Além destas variáveis, poderá haver interesse em se considerarem ainda as propriedades químicas com eventual importância nas características do transporte sólido na albufeira, embora geralmente essa consideração seja dispersável nos rios.

As correntes de densidade, referidas em 2.3, serão reveladas nas observações efectuadas com um grau de precisão elevado. À medida que as observações forem menos exaustivas a "nitidez" dos fenómenos diminui, perdendo-se a noção dos fenómenos de transporte sólido em profundidade se as observações forem escassas.

Por último, deve ser mencionado o interesse de se atender à agitação da superfície livre que, devido à grande área desta, pode apresentar ondulação importante e dar origem a fenómenos de "transporte sólido das margens" semelhante ao transporte litoral marítimo. A acção do vento na superfície da albufeira será tanto mais importante quanto maior for o seu "fetch".

3.1.4 - Observação do mecanismo da deposição dos sedimentos

A observação dos fenómenos de deposição é mais difícil do que a do transporte sólido. Na realidade, a deposição, de maneira semelhante a erosão, pode dar-se em locais, em ocasiões e em quantidades tais que não seja fácil a percepção do fenómeno, só sendo reconhecido indirectamente pela constatação de aumento de material em determinado local ou da diminuição do transporte sólido de um escoamento entre duas secções. Utilizando todos os dados da observação da erosão, transporte e deposição, procura-se correlacionar os valores que exprimem a quantidade e qualidade dos depósitos com os parâmetros que caracterizam as situações temporais e espaciais apresentadas pela albufeira e rios no decorrer dos fenómenos aluvionares.

Deve notar-se que a observação do mecanismo da deposição na albufeira

exige a formação de uma equipa constituída por especialistas e técnicos com várias formações. Apesar de se poder dispor de registos automáticos de certas variáveis como as meteorológicas e hidrológicas, na medição de caudais sólidos, recolha de amostras de material sólido, etc, tal não acontece, exigindo estas medições uma presença humana que será tanto mais necessária quanto maior for o grau de precisão exigida nas medições.

Para a análise numérica dos registos, é vantajosa, senão necessária, a utilização de computadores para cálculo automático.

Chega-se assim à conclusão de que qualquer observação do mecanismo da deposição em albufeira a efectuar requer um fundo monetário e humano suficientemente grande sendo indispensável mostrar o interesse ou a necessidade de empreende-la para que as entidades se decidam a financiar tal observação.

3.1.5 - Exemplos de campanhas de observação do mecanismo do assoreamento de albufeiras

Para finalizar, mencionam-se dois estudos que procuram seguir os fenómenos de assoreamentos: um deles na Argélia e outro mais recente, na Rússia.

O primeiro foi efectuado a partir de 1937, nas barragens argelinas, que estão sujeitas a intensos fenómenos de assoreamento (DUQUENNOIS 1955). As observações incidiam predominantemente nas correntes de densidade, e serviram de base para posteriores estudos sobre métodos de controle dos assoreamentos. Assim, em Dezembro de 1937, são observadas, na barragem de Oued Fodda, os escoamentos das descargas do fundo, com medições dos caudais e respectivas densidades de líquidos escoados, assim como o tempo de abertura e número de comportas de descarga. Posteriormente, em Abril de 1939, foram efectuadas observações semelhantes na barragem de Ghrib. As medições mais importantes, efectuadas em Iril Emda nos anos 1953, 1954 e 1955, consistiam essencialmente em:

- medição da densidade da água da albufeira a diferentes cotas, por meio de tubos de recolha escalonados

- observações dos caudais, sólido e líquido, evacuados pelas descargas de fundo

- medição do volume dos depósitos

Tendo sido reconhecidos como necessários os elementos seguintes:

- topografia da albufeira

- levantamentos periódicos de algumas secções escolhidas na albufeira (transversais e longitudinais)

- valores de caudais líquidos afluentes e variações de níveis de água

- registos de manobra das comportas de descarga

- distribuição das concentrações de material sólido na albufeira

- relações entre densidades da mistura evacuada e a repartição de densidades na albufeira

- distribuição de temperatura na albufeira

- evolução das capacidades de armazenamento da albufeira

- valores de velocidades de correntes de densidade

O segundo estudo (SHVARTSMAN 1964) foi efectuado na albufeira de Kremenchug nos verões de 1961 e 1962. Tinha como finalidades a investigação da turvação na citada albufeira, ou, mais precisamente, o conhecimento dos processos de formação da turvação, a determinação da sua correlação com os vários factores que afectam a formação e distribuição dessa turvação e a obtenção de dados para a verificação de 2 métodos de cálculo teórico devidos aos russos Karaushev e Bashkirov.

A albufeira estudada tem o comprimento de 126 km e a largura máxima de 25 km com profundidades de 20 m. Numa das margens da albufeira foram escolhidas duas zonas para observação, uma no verão de 1961 e a outra no verão de 1962.

Em cada zona efectuaram-se as seguintes observações:

- levantamento topográfico detalhado

- análise da constituição granulométrica do material do fundo

Também se definiram perfis onde periodicamente foram observadas:

- turvações
- profundidades do escoamento
- velocidades de escoamento
- direcção das correntes
- caudais líquidos e sólidos
- composição granulométrica do material sólido de fundo e transportado

em suspensão

- características da ondulação

Por fim, na posse dos valores recolhidos, compararam-se os resultados obtidos nas observações com os valores calculados pelos dois métodos teóricos acima referidos.

3.2 - Observação dos assoreamentos das albufeiras. Levantamentos

3.2.1 - Introdução

Embora só a observação do mecanismo global dos fenómenos sedimentares permita a obtenção de conclusões mais válidas sobre o assoreamento das albufeiras, na prática, por motivos económicos, é-se, na maior parte das vezes, levado a empreender observações mais modestas, e por isso de custo menos elevado. Apesar de não ser possível obter a riqueza de informações conseguidas em observações mais detalhadas consegue-se mesmo assim correlacionar os valores de grandezas observadas com características dinâmicas que se obtêm dos registos de rotina de vários Serviços Nacionais de Meteorologia, Hidrologia, etc... Estas observações, poder-se-ão chamar levantamentos sempre que definam os depósitos existentes quanto ao seu volume e características físico-químicas.

Quanto à sua finalidade os levantamentos podem ser de dois tipos: levan-

tamentos topo e hidrográficos e levantamentos sedimentológicos.

Os levantamentos topo e hidrográficos consistem na determinação da configuração da superfície dos depósitos, e, por via directa ou indirecta, o volume destes. O volume pode ser medido directamente se se puder determinar as espessuras dos depósitos acumulados num dado intervalo de tempo por meio de qualquer equipamento para esse fim projectado. Essas mesmas espessuras podem ser obtidas indirectamente ao compararem-se dois levantamentos efectuados com o intervalo de tempo dado. Para a determinação das configurações da superfície dos depósitos utilizam-se os equipamentos topográficos habituais se aqueles estão a seco, ou utiliza-se material hidrográfico quando os depósitos se encontram submersos. O trabalho de gabinete de cálculo dos volumes é semelhante àquele que se faz para o cálculo do volume de movimentação de terras.

O levantamento sedimentológico procura caracterizar física e quimicamente os depósitos. Como estes são heterogéneos, a caracterização é efectuada por recolha criteriosa de amostras. sendo evidente que a um maior número de amostras corresponde um melhor conhecimento. As amostras são obtidas com equipamento especial, sendo vários os sistemas de recolha os quais dependem dos fins em vista. Se, por exemplo, se pretender conhecer o peso específico dos grãos e a sua granulometria, a amostra dos sedimentos pode ser alterada, enquanto que para certas propriedades físicas e químicas deve ser recolhida tal qual se encontra "in situ", isto é, a amostra deve ser intacta.

Uma das propriedades com muito interesse prático é o peso específico dos depósitos tal qual se encontram. Por um lado, os depósitos são mais facilmente medidos em volume, e, por outro lado, os caudais sólidos em suspensão são geralmente expressos em unidades de peso; a relação destes dois valores é então feita por intermédio do peso específico dos depósitos que pode variar muito de local para local dependendo da granulometria e porosidade dos sedimentos.

O levantamento sedimentológico é relativamente mais demorado e consequentemente mais caro. Enquanto as medições topo e hidrográficas estão muito facilitadas por aparelhagem cada vez mais sofisticada possibilitando medições e registos contínuos, e os respectivos cálculos de gabinete completamente automatizáveis, a recolha de amostras requer maior tempo no trabalho de campo, análises laboratoriais e ainda o subsequente processamento numérico. Torna-se pois pertinente a investigação de métodos a utilizar futuramente nos levantamentos sedimentológicos, de modo a facilitá-los e a diminuir os seus custos.

A frequência com que os levantamentos são feitos deve depender principalmente da quantidade do material sólido afluente à albufeira em percentagem da capacidade deste.

Segundo o TASK COMMITTEE OF SEDIMENTATION MANUAL 1970, a escolha de frequência dos levantamentos deve atender a:

- registos obtidos nas estações de medição de transporte sólido, colocadas a montante da albufeira
- curva de capacidade da albufeira obtida através dos registos dos volumes afluentes e efluentes durante as operações
- medidas em poucos perfis de reconhecimento.

Dever-se-á, ainda efectuar levantamentos em circunstâncias especiais tais como:

- quando se esvazia a albufeira
- nas cheias com pouca probabilidade de ocorrência
- antes da construção de outra barragem a montante.

Apoiando-se nestes critérios podem escolher-se os intervalos entre levantamentos os quais, segundo a mesma entidade, devem ser, em média, de 5 a 10 anos.

Evidentemente que deve também atender-se a um critério económico, sem-

pre difícil de caracterizar, que procure contrabalançar a economia resultante do conhecimento do assoreamento com o custo do levantamento a efectuar.

3.2.2 - Técnicas de levantamentos topo e hidrográfico em albufeiras

3.2.2.1 - Métodos utilizados para a determinação da superfície dos depósitos

Fundamentalmente há dois métodos para definir a superfície dos depósitos na albufeira:

- a) Método das curvas de nível
- b) Método dos perfis transversais

a) Método das curvas de nível

Neste método a superfície dos depósitos é definida com curvas de nível que podem ser obtidas de diversos modos. Quando a albufeira se encontra com água, as curvas de nível obtêm-se por interpolação entre pontos medidos com sondagens, ou por processos topográficos correntes conforme a zona considerada está submersa ou emersa. Chama-se a a tenção para o facto de que na zona submersa a obtenção de curvas de níveis a partir de pontos não é tão perfeita como nas zonas secas porque nestas há a possibilidade de se escolherem os pontos necessários e suficientes para a correcta definição do terreno enquanto naquelas apenas se impõem sondagens em pontos, segundo determinada malha, embora esta possa ser mais apertada se as profundidades medidas variarem significativamente numa malha mais larga.

Nas ocasiões em que se efectuar um esvaziamento, total ou quase, da albufeira, pode utilizar-se, com grande eficácia, processos aerofotograméticos. Obtêm-se as curvas de nível directamente, se se efectuarem fotografias para vários níveis da água na albufeira, quer aproveitando a descida do nível de água, quer a sua subida. Se houver locais em que permaneça água, estes serão

facilmente levantados por sondagens devido à sua relativamente pequena dimensão.

b) Método dos perfis transversais

A determinação da configuração do fundo da albufeira pode ser definida por perfis transversais, que o atravessam.

Embora se possa efectuar a sondagem ponto por ponto, a razão de ser deste método reside principalmente na possibilidade de utilização de processos de sondagem contínua.

Apresenta-se na Fig. 3.1 a planta de uma hipotética albufeira em que estão marcados os perfis transversais utilizados no levantamento e o sistema de numeração destes.

A escolha de um destes métodos depende do tipo de equipamento disponível e das características topográficas da albufeira. Mas para os dois métodos é necessário a implantação de estações de triangulação e marcos duráveis de modo a ser possível referenciar qualquer levantamento mesmo passado muito tempo. A altura ideal para a sua implantação, seria durante a construção da barragem o que muitas vezes não é levado a cabo, ou mesmo ainda antes quando se efectuar o levantamento inicial da albufeira com a finalidade dos estudos do projecto. Este serviria ainda como termo de comparação de todos os levantamentos subsequentes. Mas na falta de um levantamento inicial seria vantajoso implantar os marcos assim que fosse possível.

A precisão com que a superfície dos depósitos fica definida varia, para um dado método, com a densidade de pontos ou de perfis utilizados. A maior precisão obtém-se pelo processo fotogramétrico quando se esvazia a albufeira, sendo só economicamente aplicável quando, por qualquer motivo, se proceder a esse esvaziamento.

A comparação entre os dois métodos é difícil de fazer para casos gerais,

sendo preferível analisar caso por caso para se concluir do grau de precisão atingível por cada um dos métodos. Para casos particulares, até se poderá concluir da vantagem em se utilizar os dois métodos no levantamento de uma mesma albufeira, cada um deles em determinada zona.

3.2.2.2 - Equipamento utilizado nos levantamentos

Em todos os levantamentos que utilizem os métodos topográficos habituais, o equipamento é o que se emprega em trabalhos de topografia. Para o levantamento de locais submersos é necessário utilizar equipamento especial, que inclui, pelo menos, uma sonda, aparelhos de posicionamento e uma embarcação.

a) Equipamento de sondagem

O equipamento de sondagem depende fundamentalmente das profundidades e da extensão da albufeira. Nas pequenas albufeiras, em que as profundidades não atingem os 15 m, podem utilizar-se métodos manuais, como sejam as sondas de vara ou de prumo. Nas albufeiras maiores é conveniente a sondagem ultra-sonora.

A sonda de vara só deve ser utilizada até profundidades de 9 m, porque para profundidades maiores é de difícil manejo. A sonda de prumo pode atingir maiores profundidades. Ambas as sondas exigem que a embarcação estacione, numa determinada vertical, o tempo necessário para mergulhar a sonda e registar a leitura da profundidade, tornando-se assim morosos os levantamentos, tanto mais quanto maior for a precisão desejada e quanto maiores as profundidades medidas. A sonda de eco permite aumentar a velocidade do levantamento, melhorando ao mesmo tempo o grau de precisão obtido e fornecendo registos dos perfis transversais em papel ou em fitas perfuradas ou magnéticas utilizáveis em cálculos automáticos. A medição da profundidade com esta sonda baseia-se na medição do tempo decorrido entre o instante da emissão de um sinal ultra-sonoro de gran

de energia e o instante da recepção desse mesmo sinal depois de reflectido no fundo da albufeira. O tempo entre a emissão e a recepção do sinal é função da distância percorrida e das características da água. Sabendo-se a temperatura e a salinidade conhece-se a velocidade de propagação da onda sonora e por consequência a profundidade, que é metade da distância percorrida. Através de componentes electrónicos e mecânicos os tempos entre a emissão e a recepção do sinal são transformados em profundidades e registados convenientemente enquanto a embarcação que transporta o aparelho se desloca ao longo do perfil ou de um percurso previamente escolhido.

O instrumento de sondagem sonora é constituído por 3 unidades (Fig.3.2).

- registador
- emissor-receptor
- gerador de corrente

O registador transforma o sinal eléctrico recebido em perfis desenhados num papel, ou em fitas perfuradas ou magnéticas de computador.

O emissor-receptor é uma unidade que se coloca ligeiramente mergulhada, e que tem como função emitir o sinal sonoro e captá-lo depois de reflectido no fundo. A energia necessária para a emissão é fornecida por um gerador de corrente, motor ou bateria.

Três observações devem ser feitas a este processo de sondagem:

1) A onda sonora emitida propaga-se numa porção de espaço limitado por uma superfície cónica de eixo vertical com vértice no emissor. À medida que a profundidade aumenta, maior é a área do fundo da albufeira que reflecte o sinal emitido, perdendo-se uma parte do sinal que não é recebido no aparelho. O ângulo de divergência dessa superfície cónica (Fig. 3.3) depende da potência do emissor; quanto maior for esta, menor será o ângulo obtendo-se maior precisão para as profundidades elevadas.

Como o sinal é reflectido numa maior ou menor área (Fig. 3.3), o regis-

gisto obtido pode corresponder a cota de um ponto que não esteja colocado na vertical do emissor mas sim no interior do cone de propagação, dando origem a ligeiras distorções do registo, embora sem importância na maioria dos casos.

Na Fig. 3.4 apresenta-se o registo da sondagem de um perfil transversal de uma albufeira. Nele são visíveis 4 perfis paralelos que correspondem a vários ecos. Nota-se que a distância entre eles se mantém praticamente constante, correspondendo aos vários percursos de ida e volta efectuados pelo sinal sonoro, e que a intensidade da mancha vai diminuindo porque a energia do sinal decresce.

2) A sondagem ultra-sonora é capaz de distinguir o peso específico dos depósitos submersos. Na realidade a penetração do sinal, para uma dada frequência da onda sonora, é função do peso específico do material depositado. Na mesma figura 3.4 são visíveis as diferentes espessuras das manchas do sinal principal recebido; a diferentes espessuras correspondem pesos específicos diferentes.

3) A forma do casco do barco e o método de suspensão do emissor-receptor são importantes porque podem provocar bolhas de ar que absorvem a onda ultra-sonora e impedem o retorno do sinal para o receptor. Por esta razão, é preferível um barco com casco em V que origina a formação de menor número de bolhas durante a sua deslocação.

b) Equipamento de localização dos pontos de sondagem

Como é evidente, é necessário localizar em planta os pontos de sondagem, quer estes sejam discretos espalhando-se numa determinada área, quer façam parte de uma determinada trajectória. O método utilizado para a localização dos pontos depende do modo como se efectua o levantamento, do equipamento utilizado e do respectivo pessoal, mas de modo geral é de um dos três tipos seguintes: método topográfico habitual, utilização de instrumentos de medição mecânicos e utilização de instrumentos de medição electrónicos.

Quando os pontos se espalham por uma dada área é habitual utilizarem-se os métodos topográficos clássicos.

Quando se pretende medir distâncias num alinhamento recto que demarca o perfil a levantar podem-se utilizar vários aparelhos que indicam continuamente a distância a que a embarcação se encontra da origem. Estes dispositivos podem ser mecânicos como é exemplo o da Fig. 3.5. Trata-se de uma roda medidora que rola, sem escorregar num cabo de aço unindo as duas margens. O deslocamento da embarcação faz mover a roda que está ligada a dispositivos medidores de rotações. As distâncias assim medidas ou são indicadas num mostrador-totalizador ou são registadas no mesmo papel onde se desenha o perfil da sondagem sonora. Se os dispositivos são electrónicos permitem uma medição cómoda e simples; mas sendo mais caros que os outros mencionados, é necessário torná-los rentáveis por intermédio de utilização intensiva, já que, por sua natureza, permitem elevadas velocidades de trabalho.

Os sistemas electrónicos, geralmente, baseiam-se na medição do intervalo de tempo que decorre entre o instante de emissão e o instante de recepção de ondas electromagnéticas; são portanto sistemas formalmente semelhantes ao que se emprega na sondagem ultra-sonora, pelo que é conveniente examinar sempre quais os condicionalismos a que pode estar sujeita sua utilização num determinado local.

Pode dizer-se que, neste campo, o aperfeiçoamento é constante devido à acelerada evolução tecnológico dos sistemas electrónicos, a qual tem conduzido à construção de aparelhos cada vez mais precisos e mais compactos facilitando o seu manuseio por pessoal não especializado. Não sendo possível indicar uma série completa de aparelhos existentes, apenas se apresentam dois como exemplo.

Um deles, o sistema Raydist (SHEPHERDSON 1963), mede distâncias comparando a fase de duas ondas de rádio continuamente irradiadas por dois emis-

sores, sendo um fixo e o outro móvel. Tem como vantagens:

- mede continuamente distâncias variáveis por um método preciso e rápido;
- é capaz de tornar a localizar rapidamente qualquer ponto pretendido;
- tem utilização versátil e de grande mobilidade;
- elimina o trabalho de triangulação e o correspondente trabalho de gabinete;
- reduz os problemas de visibilidade;

e tem as seguintes desvantagens:

- alto custo inicial;
- é menos preciso quando utilizado ao pé de margens abruptas e para pequenas distâncias
- necessita assistência ocasional de técnico electrónico altamente especializado.

O outro tipo de aparelho, apresentado como exemplo, permite grande liberdade nos levantamentos (ENGINEERING NEWS-RECORD, August 11, 1966). O aparelho tem um visor que mede electronicamente a distância entre um ponto da margem, onde se coloca o aparelho, e um ponto da embarcação em movimento; este visor, por sua vez, está ligado a um traçador gráfico que vai desenhando num papel o percurso efectuado pela embarcação (Fig. 3.6) É necessário apenas, para que se defina a posição absoluta, conhecer as coordenadas do ponto onde se coloca o aparelho, assim como uma direcção-referência para orientar o desenho.

Apresentam ambos os aparelhos a vantagem de se poder escolher arbitrariamente um percurso; ou de, apesar de se imporem previamente perfis a levantar, registar o percurso realmente efectuado. Os levantamentos atingem grande rapidez de execução e podem ser realizados tanto de dia como de noite.

c) Embarcação e equipamento auxiliar

A dimensão de embarcação depende da grandeza da albufeira. Para albufeiras

pequenas é mais adequado um barco de pequeno calado. À medida que a albufeira aumenta, o barco pode ser maior, sendo muitas vezes preferível ter 2 barcos, um para o material de medição e o outro só para transporte de pessoal.

As características da embarcação podem ser escolhidas em face das particularidades de cada albufeira. A embarcação deve poder transportar todo o equipamento a utilizar permitindo um funcionamento eficiente nas medições. Geralmente é movida a motor podendo eventualmente, em certas zonas, ser necessário o uso de remos.

Na Fig. 3.7 apresenta-se um tipo de embarcação constituída pela união de dois barcos, aproveitando-se o intervalo entre os dois para a movimentação de material de sondagem. Na mesma fotografia vê-se a estrutura em forma de A que serve para içar o material mergulhado.

Para maior estabilidade de plataforma pode ser preferível utilizar jangadas ou barcos do tipo catamaran em vez de barcos de uma só carena.

Se se pretender empregar a mesma embarcação em levantamentos de várias albufeiras de uma mesma região, é necessário considerar um reboque e respectivo camião-tractor para se proceder ao transporte do material de albufeira para albufeira.

Como equipamento auxiliar, a utilizar, especialmente em grandes albufeiras, citam-se por exemplo, os intercomunicadores, com a finalidade de permitir comunicações entre o pessoal, quer para contactos de rotina quer para emergências.

3.2.2.3 - Cálculo do volume dos depósitos

O volume dos sedimentos depositados num dado intervalo de tempo, obtém-se, geralmente, comparando as capacidades que a albufeira apresenta em duas datas separadas por aquele intervalo de tempo. Mais raramente e para pequenas albufeiras medem-se as espessuras dos depósitos, calculando-se portanto directamente o volume destes.

Os métodos de cálculo da capacidade da albufeira variam conforme se utilizam os levantamentos por curvas de nível ou por perfis transversais. Indicam-se a seguir os sugeridos pelo TASK COMMITTEE 1970:

- a) Quando se efectua o levantamento pelo método das curvas de nível

a.1) Método da curva da área da superfície de nível da albufeira

Este método consiste na medição gráfica da área compreendida entre o eixo das ordenadas (cotas) e a curva que representa a relação entre a área da albufeira e sua cota altimétrica (Fig. 3.8).

Analiticamente é

$$V = \int_{h_0}^{h_{\max}} Adh \quad (3.1)$$

em que

V - capacidade da albufeira

A - área da albufeira à cota h

h_0 - cota mínima da albufeira

h_{\max} - cota de máxima retenção da albufeira

a.2) Fórmula da área média

É uma simplificação do anterior método em que se procede ao cálculo numérico em vez de medição gráfica.

Tem como passos:

- Determinação da média das áreas de dois níveis consecutivos (Fig. 3.8)

$$\bar{A}_i = \frac{A_i + A_{(i+1)}}{2} \quad (3.2)$$

- Volume entre esses dois níveis

$$V_1 = \bar{A}_i (h_{i+1} - h_i) \quad (3.3)$$

- Volume total = capacidade

$$V = \sum_{i=0}^n V_i \quad (3.4)$$

a.3) Fórmula prismoidal modificada

Semelhante ao interior mas considerando a formulação do volume de um tronco de prisma em vez da média aritmética das áreas das superfícies de nível.

Volume entre dois níveis (Fig. 3.9).

$$V_i = \frac{d_i}{3} (A_1 + \sqrt{A_i \cdot A_{i+1}} + A_{i+1}) \quad (3.5)$$

- Capacidade

$$V = \sum_{i=0}^n V_i \quad (3.6)$$

a.4) Regra de Simpson

Variante das anteriores, emprega-se esta regra para o cálculo aproximado da área mencionada em a.1). É no entanto necessário considerar uma divisão da altura ($h_{\max} - h_0$) em número par de partes.

A capacidade será então

$$V = \frac{1}{3} d \left[A_0 + A_n + 4(A_1 + \dots + A_{n-1}) + 2(A_2 + A_4 + \dots + A_{n-2}) \right] \quad (3.7a)$$

em que

$$d - \text{desnível considerado} = \frac{h_{\max} - h_0}{n}$$

b) Quando se efectua o levantamento pelo método dos perfis transversais

b.1) Método da curva: área do perfil-distância do perfil à barragem

Fig.(3.10)

A capacidade da albufeira obtém-se pela medição da área compreendida entre a curva que relaciona a área do perfil transversal e a distância ao longo do talvegue desse perfil à barragem. Quando a albufeira apresenta vários braços, a cada um deles corresponde uma curva semelhante em que se medem as distâncias em relação à confluência. Na figura apresenta-se uma albufeira com um rio afluente além do rio principal.

Analiticamente é

$$V = \sum_{j=1}^K \int_0^{l_j} E dl \quad (3.8)$$

em que

E - área da secção transversal à distância l, ao longo do talvegue, da

barragem ou da confluência

l_j - distância máxima ao longo do talwegue entre a barragem e o limite montante da albufeira ou entre a confluência dos afluentes e esse mesmo limite

K - número total de afluentes incluindo o rio principal

b.2) Fórmula da área média

Semelhante a a.2). Como no caso dos perfis transversais não há paralelismo, que havia quando se consideravam as curvas de nível, só é aconselhável empregar este método para albufeiras com perfis aproximadamente paralelos e nos cursos em que a largura da albufeira vai variando gradualmente.

b.3) Regra de Simpson

Aplicam-se as mesmas considerações de b.2), só devendo aplicar-se a pequenas albufeiras em que os perfis podem ser definidos, como indica a Fig.3.11 por uma série de perpendiculares a um alinhamento recto base.

A capacidade é então expressa por

$$V = \frac{1}{3} d \left[E_0 + E_n + 4(E_1 + E_3 + \dots + E_{n-1}) + 2(E_2 + E_4 + \dots + E_{n-2}) \right] \quad (3.7b)$$

onde

d - distância entre perfis transversais

E_1 - área do perfil transversal

n - número par de zonas entre perfis

b.4) Fórmula de Eakin

Esta fórmula baseia-se na fórmula prismoidal de Dobson (EAKIN 1939). A capacidade de um troço da albufeira compreendida entre 2 perfis transversais, tendo 2 afluentes nesse troço (ver 3.12), pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$V_i = \frac{A_i}{3} \left(\frac{E_i + E_{i+1}}{W_i + W_{i+1}} \right) + \frac{A_i}{3} \left(\frac{E_i}{W_i} + \frac{E_{i+1}}{W_{i+1}} \right) + \frac{h_{jo} E_{jo} + h_{ko} E_{ko}}{3} \quad (3.9)$$

onde

V_i - capacidade do troço i

A_i - área total da superfície de cota máxima (limitada pelo tracejado mais grosseiro)

A'_i - área da superfície definida pelas linhas de cota máxima dos perfis transversais principais e pelos segmentos que se obtêm unindo as intercepções daquelas linhas com a curva de nível de cota máxima (quadrilátero $abcd$)

E_i - área do perfil transversal de ordem i

W_i - largura superficial do mesmo perfil

h_{k_0} - distância entre o perfil transversal do tributário k_0 e a confluência deste no talvegue principal

h_{j_0} - distância entre o perfil transversal do tributário j_0 e a intercepção do seu talvegue com o perfil transversal principal (caso em que a confluência do tributário fica fora do troço).

Para a determinação da área A'_i é necessário conhecerem-se dois valores:

l_i - distância entre o perfil transversal principal de jusante e a margem esquerda do perfil de montante

l_{i+1} - distância entre o perfil transversal principal de montante e a margem direita do perfil de jusante.

c) Utilizando ambos os tipos de levantamentos, ou seja conhecendo áreas de superfícies de nível e os valores das áreas de perfis transversais

c.1) Método do factor constante de Burrel

Este método, proposto por BURREL 1951, é muito prático, especialmente para grandes albufeiras, porque nele é determinado um factor que pode ser utilizado em todos os levantamentos que nelas se realizarem posteriormente.

O referido autor define segmento como sendo o espaço da albufeira compreendida entre dois perfis transversais, o fundo e o nível de cota de máxima retenção. Este ainda se subdivide em subsegmentos que são partes de seg

mento compreendidos entre duas superfícies de nível.

O volume dos sedimentos depositados num segmento é dado pela expressão

$$V_{si} = \frac{V_0}{E_i + E_{i+1}} (E_{si} + E_{s(i+1)}) \quad (3.10)$$

em que

V_0 - volume inicial do segmento

E_i, E_{i+1} - áreas dos perfis transversais que limitavam o segmento respectivamente a jusante e a montante

$E_{si}, E_{s(i+1)}$ - área dos referidos perfis transversais, ocupada pelos sedimentos

Como se vê, o factor constante é

$$f_i = \frac{V_0}{E_i + E_{i+1}} \quad (3.11)$$

que só depende das condições iniciais. Em posteriores levantamentos as áreas E_{si} e $E_{s(i+1)}$ são facilmente obtidas por diferença das áreas dos perfis determinadas com um dado intervalo de tempo, sendo o volume total dos depósitos dado pela expressão

$$V = \sum_{i=0}^n f_i (E_{si} + E_{s(i+1)}) \quad (3.12)$$

onde

f_i - factor constante de Burrell do segmento i

n - número de segmentos da albufeira

Há toda a vantagem em conhecer o grau de precisão que cada método consegue dar aos valores calculados, sendo para isso necessário que sejam empreendidas medições experimentais e cálculos exactos com tal fim.

HEINEMAN e DVORAK 1963, realizaram esse tipo de medições em pequenas albufeiras, sendo uma delas a de Olson, nos EUA, com cerca de 430 m de com-

primento e 5,7 m de profundidade. Os valores de capacidade da albufeira obtidos por vários métodos apresentam-se no quadro 3.1. Vê-se nesse quadro a boa concordância dos valores sendo de 5,6% o desvio máximo obtido relativo à média dos valores. Os autores concluem nesse trabalho que para pequenas albufeiras o melhor método de levantamento é pelos perfis transversais perpendiculares a uma linha base conforme se indica na Fig. 3.10, havendo ainda um número óptimo de perfis, acima do qual o aumento de precisão não compensa o maior custo da operação. Para esse tipo de levantamentos e de albufeira, os autores concluem ainda que:

- os métodos de cálculo que utilizam curvas de nível são vantajosos em relação aos outros.
- o método da curva de área da superfície de nível da albufeira (a.1) é o mais directo, simples, preciso e uniformemente adaptável para determinar a capacidade da albufeira
- o método da área (a.2) é simples mas pode apresentar erros especialmente se há uma grande diferença entre as áreas dos dois níveis próximos
- o método da fórmula prismoidal modificada (a.3) requer mais cálculos que o anterior e não tem maior precisão
- a regra de Simpson (a.4) requer um espaçamento regular entre as curvas de nível o que limita a sua utilização
- o método da curva área do perfil - distância ao longo do talvegue do perfil à barragem (b.1) requer a perpendicularidade aproximada dos perfis em relação ao sentido do escoamento e também o paralelismo aproximado deste; é necessário pois um grande número de perfis para definir bem a curva
- o método da área média (b.2) é simples, tem o mesmo inconveniente de (a.2), mas não fornece elementos para o conhecimento da relação altura de água-capacidade da albufeira
- a fórmula de Eakin requer grande quantidade de cálculos aproximados,

dependendo as equações utilizadas (3.9), da forma de localização da albufeira, sendo diferente para os seguintes casos:

- 1) o primeiro segmento junto à barragem
- 2) segmentos triangulares devido a tributários
- 3) segmentos meandrizados
- 4) segmentos curtos e rectos
- 5) segmentos finais.

Não se conhecem experiências do género realizadas em albufeiras grandes, mas as considerações acima indicadas podem aplicar-se sem grandes modificações, havendo apenas que atender à nova escala.

Outro autor, GOTTSCHALK 1951, diz que os levantamentos de pequenas albufeiras de formas regulares realizados pelo método dos perfis têm uma precisão da ordem dos 2%, enquanto que para formas irregulares, com muitas reentrâncias, características de vale muito variáveis, etc, o erro passa para 10%.

Para albufeiras grandes, não se conhecem os erros, mas mesmo se forem da ordem dos 20 a 40% a informação obtida é preferível ao total desconhecimento que muitas vezes se tem de grandeza dos assoreamentos.

3.2.3 - Técnica de levantamento sedimentológico em albufeiras

3.2.3.1 - Planeamento dos levantamentos

O levantamento sedimentológico procura caracterizar do ponto de vista geológico, físico, químico, mineralógico, o depósito existente na albufeira. Como este apresenta grande heterogeneidade tanto em planta como em profundidade, a recolha de amostras é o método a utilizar. Assim o planeamento do levantamento consiste em:

- definir a data de realização;
- escolher o número e localização das amostras a recolher;

- adquirir ou preparar o material a utilizar;
- organizar as turmas de trabalho;
- preparar e realizar as análises laboratoriais;
- interpretar os resultados.

Todos os passos mencionados estão interrelacionados havendo ainda a considerar um eventual planeamento conjunto dos levantamentos hidrográficos e sedimentológicos. A maior ou menor relação dos dois levantamentos depende essencialmente do equipamento utilizado no levantamento hidrográfico.

Quando se utiliza um processo de sondagem por meio de vara ou de sonda de prumo, pode aproveitar-se a paragem da embarcação para a execução tanto da sondagem como da recolha de amostra. Se se utiliza a sondagem ultra-sonora, na qual a embarcação percorre o perfil sem paragem, é então necessário que se efectue a recolha de amostras noutra embarcação.

Há toda a vantagem em reunir os dois levantamentos e em efectuar primeiramente a sondagem para que se conheçam razoavelmente os locais de recolha das amostras.

É evidente que a um maior número de amostras corresponde um melhor conhecimento das características dos depósitos, mas por outro lado tem de atender-se a razões de economia e portanto fixar-se o número óptimo segundo critérios difíceis de serem generalizados. Juntamente com o número é escolhida a localização das amostras tanto em planta como em profundidade através dos depósitos. Na escolha do ponto de recolha na vertical é difícil determinar com antecedência o número, fixando-se antes critérios que impõem distâncias entre amostras recolhidas numa mesma vertical.

O equipamento para a recolha das amostras varia essencialmente com as condições em que se encontra o terreno do qual se extrai a amostra e com o fim para o qual se faz a recolha.

Os depósitos de sedimentos podem estar a descoberto, o que facilita o

trabalho, ou podem estar submersos, a maior ou menor profundidade; e podem ser constituídos por material de grão grosseiro ou serem de granulometria fina, apresentando neste caso vários graus de consistência. Para cada tipo de depósito ou para cada finalidade de recolha existe um tipo de aparelho mais adequado.

Se o depósito está descoberto pode ser aberto um poço para observação visual dos depósitos, extraíndo-se as amostras desejadas ou pode ser utilizado equipamento de recolha de tarolos. Se o depósito se encontra submerso utiliza-se equipamento que é mencionado em 3.2.3.2.

As amostras recolhidas são identificadas e mandadas para o laboratório a fim de serem analisadas. As análises incidem principalmente na determinação do peso específico, teor em água, propriedades físicas e químicas das amostras intactas e determinação do peso específico dos grãos, análise granulométrica e química do material constituinte dos sedimentos.

A medição directa das grandezas mencionadas, não exigindo trabalho laboratorial, encontra-se ainda numa fase experimental. A única medição directa que apresenta maior eficácia é a do peso específico dos depósitos, por intermédio de uma sonda de raios gama.

Por último, e como conclusão do levantamento, é necessária a interpretação dos resultados obtidos que é feita com a ajuda de cálculos estatísticos (ver 3.2.3.3).

3.2.3.2 - Equipamento para a recolha de amostras

Numa análise de amostradores existentes, chega-se à conclusão de que cada país ou cada entidade preocupada com os problemas em estudo desenvolve o seu próprio equipamento. A maior parte do equipamento que é fabricado em série é de origem americana, existindo ainda de origem inglesa, francesa e japonesa. Neste relatório não se apresenta uma descrição detalhada de todo o

equipamento existente o que poderá ser feita posteriormente num relatório que vise, quer a aquisição quer a construção de protótipos de equipamento a utilizar nos levantamentos de albufeiras portuguesas. Os exemplos apresentados cobrem no entanto vários tipos de amostradores que são suficientemente representativos da maioria dos existentes.

Em face da variedade há o problema da escolha de amostrador a empregar em cada caso concreto de modo a se obterem amostras rápida e eficientemente. Tal escolha deve atender aos vários factores que influenciam o trabalho de recolha:

- categoria do material a amostrar, isto é, natureza, capacidade, etc;
- profundidades a que se encontram os depósitos;
- espessura do depósito a amostrar;
- energia necessária para a penetração.

Alguns destes factores não são conhecidos "a priori", principalmente quando os depósitos são submersos, o que implica a conveniência de se ter vários tipos de equipamento a utilizar no mesmo levantamento de uma albufeira quando esta apresenta grande heterogeneidade de depósitos.

a) Recolha de amostras de depósitos situados acima do nível da água

O equipamento e as técnicas de recolha dos depósitos situados acima do nível da água são os que se utilizam nos trabalhos correntes de mecânica dos solos, e estão bem documentados em vários países nomeadamente no "Earth Manual" da U.S. BUREAU OF RECLAMATION 1963.

Como exemplos mencionam-se (Fig. 3.13) alguns tipos de amostradores para recolha de amostras intactas.

a.1) Amostradores de tubo duplo

Estes amostradores, são constituídos por um tubo exterior cuja extremidade inferior é dentada, e por uma camisa no interior da qual se introduz a amostra. O tipo Denison é o maior com a camisa de 70 cm de comprimento e 15 cm

de diâmetro enquanto que o tipo Denver tem um tubo exterior mais leve e dentes cortantes menores e a camisa de 60 cm de comprimento e 13,6 de diâmetro. O comprimento das amostras recolhidas deve ser respectivamente de 60 cm e 50 cm.

a.2) Amostradores de tubo de pequena espessura

Os amostradores de tubo de pequena espessura apresentam diâmetros interiores de 7,6 cm e 12,7 cm, procurando-se que a parede seja muito fina para perturbar o menos possível o terreno donde se extrai a amostra. A espessura é geralmente de 1,6 mm para o tubo de menor diâmetro e de 3 mm para o de maior diâmetro. São construídos em aço estirado a frio e as suas extremidades cortantes tem uma saliência para o interior de cerca de 1 % do diâmetro com as finalidades de diminuir o atrito entre a amostra e a parede interior e de reter a amostra quando da extracção.

a.3) Amostradores com êmbolo

São constituídos pelos tubos indicados em a.2), de preferência sem saliência na extremidade, e por êmbolos que ajudam a amostra a manter-se no interior dos tubos.

b) Recolha de amostras de depósitos submersos

O equipamento para recolha de amostras de depósitos submersos é mais escaso porque apresenta particularidades específicas que o equipamento utilizado em estudos correntes da mecânica dos solos não resolve. Vários tipos especiais têm sido utilizados com diferentes sucessos. Pode fazer-se a divisão dos amostradores em dois grupos: os que apenas recolhem o material e os que o recolhem intacto. É neste último grupo que aparecem as dificuldades, principalmente com o aumento da profundidade a que se encontram os depósitos.

Em seguida apresentam-se alguns exemplos característicos de equipamento de recolha.

b.1) Vara escavadora (Fig. 3.14).

Este aparelho obtém amostras alteradas. É constituído por uma vara com cerca de 3 m de comprimento que suporta uma série de copos com 3 cm de comprimento. A operação consiste no lançamento da vara para o depósito submerso de uma altura suficiente para haver penetração nos sedimentos. Pode ser feita a distinção entre os depósitos e o primeiro leito por comparação dos sedimentos obtidos nos vários copos, sempre que o comprimento da vara seja superior à espessura dos depósitos e que, ao mesmo tempo, a vara possa penetrar no leito antigo. Para que os sedimentos, principalmente os elementos finos, não se percam a vara deve ser içada lentamente.

b.2) Amostrador de gravidade (Fig. 3.15)

Este amostrador recolhe amostras intactas e é constituído por um tubo de ferro galvanizado em cuja parte superior é moldado um peso em chumbo para lhe conferir a massa necessária para a penetração nos sedimentos. Na base do peso existe uma válvula esférica que possibilita a rarefação suficiente para ajudar a reter a amostra. Esta introduz-se na camisa de plástico colocada no interior do tubo depois de passar pela extremidade inferior deste, que é cortante e ao mesmo tempo fixadora da camisa. O amostrador é deixado cair livremente nos depósitos, onde penetra até a uma certa profundidade que depende da resistência oferecida por aqueles. Depois de içado para a embarcação, remove-se a extremidade cortante, coloca-se uma cápsula na amostra e extrai-se a camisa com o sedimento contido nela; por fim, fecha-se a extremidade superior e identifica-se a amostra.

A experiência mostra que este amostrador pode ser utilizado sem dificuldade em albufeiras com 30 metros de profundidade, tendo-se obtido, em depósitos de peso específico muito baixo, penetrações de 3 metros.

b.3) Amostradores de êmbolo (Fig. 3.16 e 3.17)

Na Fig. 3.16 é apresentado um tipo de mostrador utilizado em pequenas albufeiras. Feito de tubos de aço com comprimento de 0,9, 1,8 ou 2,7 metros

de comprimento, é munido de um êmbolo que se mantém junto à superfície dos sedimentos enquanto que o tubo é cravado com a ajuda da queda repetida de um peso. Este corre ao longo de uma vara que constitui ao mesmo tempo o suporte do êmbolo. As amostras intactas obtêm-se extraíndo cerca de 10 cm de cada porção de 30 cm do tarolo completo, colocando directamente em embalagens plásticas, fechadas e identificadas.

Na Fig. 3.17 apresenta-se outro amostrador deste tipo em que o processo de cravação é diferente. O amostrador é mergulhado até que o peso do gatilho toque no fundo da albufeira, a maior inércia do peso faz com que o aparelho continue a descer obrigando o tubo a penetrar nos sedimentos e estes no interior, visto que o gatilho libertou o conjunto todo, excepto o êmbolo que se mantém fixo. Quando o mostrador pára de descer procede-se ao levantamento do conjunto; primeiramente só sobe o êmbolo até que este atinge o seu travão passando de aí em diante a subir todo o aparelho com a amostra no seu interior.

Para içar estes dois amostradores, utiliza-se um guincho da embarcação.

b.4) Amostrador com vibrador (Fig. 3.18)

Na Fig. 3.18 é apresentada em esquema a operação de recolha de amostras com um amostrador que tem como particularidade a existência de um corpo vibrador utilizado na cravação do tubo amostrador. É constituído por um tubo amostrador com êmbolo, em cujo topo está montado um vibrador electromecânico, um pesado corpo hidrodinâmico e um sistema de preensão do cabo eléctrico de aço que fornece a energia ao vibrador e suporta o aparelho. Sumaria a operação pode ser descrita como se segue:

A - Descida do aparelho na posição na figura.

B - Penetração do tubo amostrador - quando o corpo hidrodinâmico toca no fundo solta o travão do tubo e ao mesmo tempo o vibrador é accionado e impulsiona o mostrador que vai descendo através dos sedimentos. Ao tocar no corpo hidrodinâmico o vibrador desliga-se e acaba a penetração.

C - Extracção - em seguida o tubo, enterrado nos sedimentos, começa a ser retirado por acção de um guincho colocado na embarcação. O corpo hidrodinâmico continua no fundo da albufeira enquanto o tubo é extraído até que a sua extremidade inferior fique tapada por uma placa existente naquele corpo.

D - Ascensão - imediatamente a seguir começa a ascensão de todo o aparelho.

c) Medição "in situ" do peso específico dos depósitos

O peso específico dos depósitos é uma propriedade que se consegue medir "in situ", não sendo indispensável a recolha de uma porção de terreno, embora haja a necessidade desta recolha em levantamentos detalhados para análise de outras propriedades físico-químicas.

Apresentam-se a seguir dois métodos de determinação "in situ" do peso específico dos depósitos.

c.1) Garrafa de areia

Utiliza-se este dispositivo na determinação do peso específico de depósitos não submersos. Consiste na escavação de determinada porção do depósito seguida do conhecimento, com areia, do buraco formado de modo a se determinar o seu volume. A pesagem do material recolhido possibilita a determinação do peso específico. Este processo é objecto da especificação E204-1967 do LNEC.

c.2) Sonda de raios gama (Fig. 3.19, 3.20 e 3.21)

A sonda de raios gama, para a determinação do peso específico de terrenos, baseia-se num fenómeno radioactivo. Quando uma fonte radioactiva (cobalto 60, rádio 226, etc.) é colocada no interior de um terreno, a sua radiação bombardeia com electrões os átomos que constituem os sedimentos. A colisão dos electrões emitidos com os electrões orbitais dos átomos dá origem ao efeito de Compton que provoca mudança de direcção dos electrões e diminuição da sua energia. Ora, o número de electrões orbitais existente no material do terreno aumenta proporcionalmente com o peso específico, e como, por outro lado, a perda de energia resultante dos choques provoca a absorção daqueles, conclui-

-se que quanto maior é o peso específico do material maior é a absorção dos electrões emitidos e por consequência menor a radiação reflectida.

A sonda de raios gama é constituída por (Fig. 3.19):

- sonda propriamente dita;
- medidor;
- guincho.

A sonda propriamente dita é constituída por um tubo no interior do qual existe um cabo coaxial que liga o medidor ao emissor-detector. Este encontra-se na extremidade inferior (Fig. 3.20) que é ponteguda para maior facilidade de penetração. Da extremidade para cima encontram-se alojados, no interior do tubo, uma ponta de chumbo, a fonte emissora, chumbo que separa o emissor do detector, este formado por contadores Geiger, e por último, pré-amplificadores transistorizados que enviam os sinais para o medidor por intermédio do cabo coaxial que também é cabo resistente.

O medidor recebe os impulsos eléctricos da sonda e regista os valores do potencial eléctrico, que estão relacionados com o peso específico por intermédio de curvas de calibração.

O guincho (Fig. 3.21) tem a função de içar a sonda.

Os valores medidos dizem respeito ao peso específico húmido ou saturado dos depósitos; para se obter o peso específico seco utilizar-se-á a expressão

$$\gamma_s = \frac{d(\gamma_h - \gamma_a)}{d-1} \quad (3.13)$$

onde

γ_s - peso específico seco do depósito

γ_h - peso específico húmido do depósito obtido por sondagem

γ_a - peso específico da água

d - densidade dos grãos constituintes do material depositado.

Deve ser frizado que o fenómeno sumariamente descrito é muito mais complexo do que pode parecer pela simples leitura da descrição que foi feita, por que na realidade o peso específico medido pela sonda, isto é, o valor do potencial eléctrico detectado depende de:

- a homogeneidade de absorção dos depósitos;
- o espectro de emissão, penetração e dispersão da radiação gama emitida pela fonte;
- a variação aleatória da radiação reflectida e recebida.

Convém pois fazer a análise química dos materiais depositados pois a existência de alguns elementos como o ferro, cálcio, manganésio e bário pode alterar significativamente os valores medidos, quando apoiados numa curva de calibração que não atenda à existencia de tais elementos. Isto implica que não se pode confiar plenamente numa medição directa com a sonda de raios gama, sendo aconselhável a recolha de amostras de sedimentos, aliás necessárias para a determinação de outras grandezas tais como a densidade dos grãos, granulometria e, o peso específico que servirá de comparação com o valor obtido com a sonda.

Por último faz-se notar que a "região de medida" do peso específico não é bem determinada, ao contrário do que acontece quando se determina o peso específico através de uma amostra intacta. Aproximadamente, pode considerar-se que a radiação recebida no detector provém 90% de um elipsóide (Fig. 3.20) cujo eixo maior corresponde á distância entre o limite superior do contador Geiger e o limite inferior da cavidade onde se aloja a fonte radioactiva e cujo eixo menor não é bem delimitado. Assim realmente a sonda indica um valor médio do peso específico do material contido naquele elipsóide.

3.2.3.3 - Análise dos resultados

Recolhidas as amostras e analisadas em laboratórios obtêm-se valores de

vários parâmetros tais como peso específico do material depositado, densidade dos grãos, granulometria, etc. Todos esses dados precisam de ser estudados procurando-se determinar relações entre os vários parâmetros em jogo.

Como exemplo de uma tal análise apresentam-se as várias relações utilizadas num levantamento efectuado em 1960 na albufeira Sabeth, Kansas, por HEINEMANN 1962.

a) relação entre a profundidade dos sedimentos em relação à sua superfície e o peso específico dos depósitos numa vertical (Fig.3.22).

De um modo geral o peso específico dos depósitos numa determinada vertical, aumenta com a profundidade em relação à superfície daqueles, havendo no entanto excepções. Como se vê na figura, a linha que relaciona aquela profundidade com o peso específico do depósito é traçada por pontos. Seno levantamento se utiliza a sonda de raios gama, os valores dos pesos específicos podem ser medidos em pontos tão próximos quanto se deseje. Na figura referida é de 15 cm a distância entre dois pontos consecutivos. Se forem recolhidas amostras intactas constituídas por tarolos, podem-se igualmente determinar os pesos específicos de vários troços com comprimentos arbitrados.

b) Variação do peso específico num perfil (Fig. 3.23 e 3. 24)

Na Fig. 3.23 mostra-se a localização das verticais onde foram recolhidas amostras no citado levantamento. Como se vê, as verticais estão alinhadas segundo vários perfis, aproximadamente perpendiculares ao escoamento, notando-se que está definido um perfil longitudinal que segue muito grosseiramente o talvegue principal. Assim, para cada perfil transversal são conhecidos os valores dos pesos específicos em vários pontos de cada vertical, a partir dos quais podem-se traçar as linhas de igual peso específico, como indica a Fig. 3.24..

c) Cálculo do peso específico médio dos depósitos da albufeira (Fig. 3.25 e 3.26 e quadro 3.2).

A partir do conhecimento da variação do peso específico dos depósitos nos vários perfis podem calcular-se os pesos específicos médios dos segmentos da albufeira compreendidos entre dois perfis transversais contíguos. No quadro 3.2 e Fig. 3.25 é exemplificado o cálculo do valor médio do peso específico de depósitos existentes em dois perfis contíguos. O valor do peso específico dos depósitos no segmento considera-se igual à media dos valores calculados para cada um dos perfis.

Repetido o mesmo esquema de cálculo em todos os segmentos obtêm-se os valores dos pesos específicos dos depósitos existentes nesses segmentos. Na Fig. 3.26 é apresentada a planta da albufeira onde, no interior de cada segmento, é indicado o peso específico médio dos depósitos, calculado por intermédio dos dados obtidos nos levantamentos topo e hidrográfico. O valor do peso total é então facilmente obtido pela soma dos pesos de todos os segmentos em que se dividiu a albufeira.

d) Relação entre o peso específico do depósito a uma determinada profundidade relativamente à superfície e a distância ao longo do talvegue à barragem (Fig. 3.27)

De uma maneira geral o peso específico dos depósitos aumenta à medida que o ponto considerado se afasta da barragem. Como se sabe, isto é devido ao aumento da dimensão média dos sedimentos depositados à medida que se caminha, na albufeira, de jusante para montante. Como já foi dito, a um maior diâmetro médio dos sedimentos corresponde um maior peso específico dos depósitos, em virtude de que para esse diâmetro, também corresponde um menor índice de vazios, pois tanto os sedimentos finos como os sedimentos grossos apresentam valores sensivelmente iguais de pesos específicos dos grãos constituintes.

É interessante notar-se que a Fig. 3.27 revela a existência de uma zona da albufeira em que o peso específico dos depósitos não varia muito em profundidade apresentando antes um valor muito constante que corresponde a depó

sitos constituídos por sedimentos grosseiros; na figura 3.26 verifica-se a existencia de um braço que afluí à albufeira naquela zona, explicando a maior dimensão dos sedimentos aí depositados

e) Relação entre o peso específico e a percentagem de argila
(Fig. 3.28)

A Fig. 3.28 tem como ordenadas o peso específico dos depósitos e em abcissas a percentagem de argila desses mesmos depósitos. É patente, aliás, como era de esperar em face do que se diz em d), que a uma maior percentagem de argila corresponda um menor peso específico. Esta figura não é mais que outra versão da Fig. 2.10 que relaciona o peso específico dos depósitos com a sua percentagem de areia.

No levantamento efectuado obteve-se a seguinte equação de correlação

$$\gamma_s = - 0,0138p + 1,61 \text{ (tf/m}^3\text{)} \quad (3.14)$$

em que

γ_s = peso específico dos depósitos

p - percentagem de argila

f) Relação entre a percentagem de argila e a distância à barragem
(Fig. 3. 29)

A partir de d) e e) facilmente se conclui que a percentagem de argila diminui na zona a montante na albufeira. A Fig. 3. 29 mostra precisamente esta conclusão, mas mostra ainda que há duas zonas de descontinuidade dos valores médios dos vários perfis devidos à existência de dois braços afluentes à albufeira como se vê na Fig. 3. 26. A figura evidencia ainda que a cada abcissa (distância dos pontos à barragem) correspondem vários valores de percentagem de argila; tal facto deve-se a que em cada vertical e em cada perfil são obtidos vários valores de percentagem de argilas existentes nos depósitos igualmente distanciados da barragem.

g) Comparação entre o peso específico medido com a sonda de raios gama e obtido pela análise de amostras recolhidas (Fig. 3. 30)

Como mostra a Fig. 3. 30 a concordância dos valores do peso específico, medidos com a sonda de raios gama e os obtidos pela análise das amostras recolhidas, é boa. Nota-se no entanto que as medidas com a sonda são em geral ligeiramente superiores. É importante frizar-se que devido à não coincidência entre o volume "observado" pela sonda e o volume analisado no laboratório, na figura apresentada os pontos marcados foram obtidos pela análise do volume homogeneizado de 2,3 ou 4 amostras recolhidas.

h) Outras relações

Com os seguintes parâmetros

h_a - profundidade da amostra no depósito

l - distância ao longo do talvegue do local à barragem

l_p - distância do local ao talvegue

p - percentagem da argila na amostra

γ_s - peso específico dos depósitos

estudaram-se várias equações de regressão das quais se obtiveram os valores apresentados no quadro 3.3.

Da análise do quadro se conclui que a equação (2) é a melhor

$$\gamma_s = 0,0270 h_a - 0,01422 p + 1,583 \text{ (tf/m}^3\text{)} \quad (3.15)$$

Os autores acrescentam ainda que podem existir outros parâmetros que influenciam o valor do peso específico, tais como os que traduzem o efeito das operações de exploração da albufeira e a curva granulométrica dos solos dada a hidrográfica, mas, como é relativamente mais difícil obtê-los, não foram considerados no estudo.

Neste levantamento as variáveis seguintes tiveram os limites de variação indicados:

Peso específico dos depósitos	0,56 a 1,47 tf/m ³
Profundidade da amostra nos depósitos	0,23 a 3,05 m
Percentagem de argila dos depósitos	20 a 70 %

3.3 - Conclusões

1) Para a compreensão global do fenómeno de assoreamento das albufeiras é necessário empreender campanhas de medições, planeadas e executadas sob a direcção de uma equipa de especialistas de várias disciplinas.

2) A observação do estado actual dos assoreamentos nas albufeiras deve ser executada com o emprego de técnicas e processos que conduzam a resultados com a precisão desejada.

- A escolha da técnica mais adequada deve considerar cada albufeira por si e a localização de perfis e estações base deve ser cuidadosamente planeada atendendo à precisão pretendida e à disponibilidade existente tanto material como humana.

- O levantamento topográfico deve ser geralmente empregado nas zonas expostas dos depósitos.

- O levantamento hidrográfico deve utilizar, nas zonas submersas das albufeiras, técnicas próprias como sejam sondagens com sonda de eco e métodos expeditos de localização das embarcações.

3) A caracterização dos sedimentos depositados na albufeira deve ser sempre feita desde que se pretenda atingir um melhor conhecimento dos assoreamentos.

- Quando só se pretende o peso específico médio dos depósitos, com o fim de converter o volume destes em peso, pode empregar-se a sonda de raios gama que é expedita na obtenção de resultados.

- Para conhecimento mais detalhado dos depósitos é necessária a recolha de amostras mediante equipamento apropriado. O levantamento sedimentológico também deve ser planeado atendendo às razões invocadas em 2).

4 - UTILIZAÇÃO DE MODELOS NO ESTUDO SISTEMÁTICO DO ASSOREAMENTO DAS ALBUFEIRAS

4.1 - Introdução

A previsão da quantidade, distribuição espacial e granulometria dos sedimentos depositados na albufeira é feita em três fases:

1) Previsão da quantidade dos sedimentos afluentes à albufeira.

Baseia-se essencialmente em modelos ou em medições de caudal sólido no rio afluente à albufeira. As medições de parâmetros hidráulicos, que com aquele caudal sólido estão relacionados por meio de modelos de transporte sólido, fornecem os valores do caudal sólido. A previsão dos sedimentos ainda se podem basear em valores de transporte sólido arbitrados aproveitando-se o conhecimento de valores obtidos em bacias de características semelhantes. Da justeza com que são conhecidos a quantidade, e por vezes qualidade dos sedimentos afluentes, depende o rigor das outras previsões que a seguir se mencionam.

2) Previsão da quantidade de sedimentos retidos na albufeira.

Nesta fase utilizam-se fundamentalmente modelos matemáticos ou físicos, nos quais se simula o comportamento hidráulico dos sedimentos na albufeira tendo em conta as condições limites que são, a montante, as características dos caudais, líquido e sólido, afluentes; a jusante, as características dos órgãos de descarga e de tomada de água; e na albufeira, a geometria desta, as características do material sólido pré-existente no fundo e as condições climáticas actuantes na superfície livre da água armazenada.

3) Previsão do valor do peso específico dos sedimentos depositados

Fase necessária para comparar valores que umas vezes estão expressos em

unidades de volume no levantamento das albufeiras) e outras vezes em unidades de peso (nas medições de caudal sólido em suspensão no rio afluente).

Os modelos utilizados tanto podem ser físicos como matemáticos. Os modelos físicos, muito usados em estudos hidráulicos, simulam numa escala reduzida, os fenómenos que ocorrem no protótipo, permitindo um controle mais ou menos fácil dos vários parâmetros que influenciam aqueles fenómenos em estudo. A utilização deste tipo de modelos tem de atender a critérios de semelhança, a fim de garantir a correcta reprodução dos fenómenos.

No domínio da hidráulica fluvial têm sido utilizados modelos matemáticos para o estudo das características dos escoamentos em leitos com fundo fixo, como seja o estudo de curvas de regolfo, de propagação de cheias, de propagação de marés nos troços flúvio-marítimos, de projectos de canais, etc. Estes modelos têm como dados a geometria do escoamento, cotas de superfície livre, caudais. A partir de formulações analíticas dos fenómenos em estudo são elaborados programas de cálculo automático. Em seguida faz-se a taragem do modelo semelhante à utilizada nos modelos físicos, isto é, arbitram-se rugosidades, expressas por coeficientes, geralmente diferentes para cada trecho em que foi dividido o rio, até que as características conhecidas do escoamento do protótipo sejam reproduzidas pelo modelo, dentro de certa gama de erros. Podem então estudar-se as modificações introduzidas no escoamento por alguma obra hidráulica.

Quando o fundo é móvel aumentam as dificuldades de utilização de modelos matemáticos porque aumentam os parâmetros em jogo e a formulação analítica não está tão bem definida como a dos escoamentos com fundo fixo.

Os modelos matemáticos são considerados neste trabalho sob dois pontos de vista. Num deles, os fenómenos são expressos analiticamente a partir de equações fundamentais obtidas por via teórica. No outro ponto de vista, o modelo consiste numa equação de regressão, de 2 ou mais parâmetros, obtida pe

la análise estatística de dados provenientes das observações de protótipo.

Os modelos baseados na via teórica são necessariamente mais gerais dos que resultam da análise de observações, mas em contrapartida a sua aplicação pode apresentar dificuldades pois que geralmente é-se conduzido a simplificações tais que os resultados obtidos não são correctos, ou pelo menos obtêm-se resultados tão correctos como os que resultam da aplicação dos modelos estatísticos que se baseiam em observações, já que é possível com eles garantir, em certas condições, resultados com elevada probabilidade de ocorrência.

Nas secções seguintes são apresentados vários modelos, sendo alguns deles obtidos teoricamente e outros empiricamente, que procuraram simular ou o fenómeno da sedimentação de um modo muito geral, ou aspectos particulares desse mesmo fenómeno.

Quanto ao campo de aplicação dos modelos, tanto os físicos como os matemáticos podem ser utilizados para prever a quantidade e a natureza dos sedimentos afluentes à albufeira e para prever a quantidade e distribuição dos sedimentos depositados na mesma. Seguidamente analisam-se cada uma das fases apresentadas no início.

4.2 - Previsão do transporte sólido afluyente à albufeira

4.2.1 - Generalidades

Como se viu em 2, a maior parte do material sólido transportado pelos rios é originado pela bacia hidrográfica. As causas da erosão são variadas e em grande número, tornando-se muito difícil a sua observação e quantificação. Mas é evidente que a previsão da quantidade de material sólido erodido na bacia hidrográfica é muito importante, sendo praticamente de pouca utilidade um conhecimento imperfeito desse quantitativo por dar origem a erros grosseiros na previsão dos volumes assoreados das albufeiras.

A previsão do transporte sólido resultante da erosão pode fazer-se a diferentes prazos e por diferentes vias. Pode ser a curto prazo ou a longo pra

zo. Pode ser por meio da análise estatística de medições ou por modelos analíticos baseados em fenómenos teóricos. No entanto em qualquer dos casos não é de estranhar que haja grandes diferenças entre os valores previstos e os realmente observados. A teoria estocástica permite fazer previsões com determinada probabilidade garantindo assim um intervalo no qual cairão, na grande maioria desses casos, os valores observados.

As previsões da erosão são difíceis e, geralmente, só são possíveis através de modelos matemáticos que procuram englobar os parâmetros mais preponderantes na erosão. Os modelos físicos não são utilizados, nem se vê possibilidade de o serem tão cedo.

As previsões do transporte sólido na secção do rio onde será construída a barragem resultam das previsões de caudais líquidos, de percentagem de sedimentos depositados antes de chegar àquela secção, etc., em suma de um estudo hidrológico.

Se existirem medições de transporte sólido na secção referida, ou noutra secção a montante, ou mesmo a jusante, as previsões são mais precisas possibilitando ainda o conhecimento da granulometria dos sedimentos. Quando não existem medições só um estudo cuidadoso da geologia da bacia hidrográfica pode fornecer elementos sobre a granulometria possível dos sedimentos. Neste último caso é importante a distinção entre solos coesivos e não coesivos da bacia porque uns e outros dão origem a sedimentos de diferentes granulometrias apresentando, conseqüentemente, diferentes propriedades físico-químicas.

4.2.2 - Modelos matemáticos que prevêm a quantidade do material sólido afluente à albufeira

4.2.2.1 - Introdução

A previsão da quantidade de material sólido afluente à albufeira pode ser efectuada por meio do modelo de transporte sólido dos rios e por meio de

modelos de "produção de sedimentos" (sediment yield) das bacias hidrográficas.

Os modelos de transporte sólido permitem prever a quantidade de material sólido transportado pelos cursos de água mediante o conhecimento de parâmetros principalmente hidráulicos.

Os modelos de "produção de sedimentos" baseiam-se no conhecimento de parâmetros que, de um modo geral, dizem respeito às bacias hidrográficas que alimentam os cursos de água.

Quaisquer modelos podem ser divididos em dois grupos: modelos empíricos e modelos fundamentalmente conceituais.

Por sua vez cada um destes grupos pode ser dividido em modelos determinísticos e modelos estocásticos.

4.2.2.2 - Modelos matemáticos do transporte sólido

Não é intenção deste relatório dar grande desenvolvimento aos modelos de transporte sólido pois que existe maior número de publicações sobre este assunto do que sobre as que se tratam dos fenómenos erosivos ou sedimentológicos. Além disso os modelos de transporte sólido podem ser partes constituintes dos modelos de sedimentação, sendo na verdade estes últimos os que têm maior interesse para o presente estudo. Por isso apenas se abordam ligeiramente os modelos de transporte sólido.

Os modelos essencialmente determinísticos são de dois tipos: os empíricos, que equivalem praticamente às chamadas leis das teorias do regime (MAHMOOD e SHEN 1971), e os conceituais. Estes últimos baseados em teorias físicas do transporte dão origem a fórmulas que relacionam os valores decadal sólido com parâmetros hidráulicos dos escoamentos. Como exemplos de conceitos físicos básicos para a dedução teórica de fórmulas de transporte sólido podem mencionar-se a tensão tangencial nas superfícies fronteiras e a

turbulência do escoamento.

As fórmulas de transporte sólido apresentadas por vários autores têm conduzido a uma grande variação de valores calculados de caudal sólido para as mesmas condições do escoamento e do fundo móvel. Isto deve-se em grande parte às diferentes origens dessas fórmulas que foram deduzidas para determinadas situações, tornando-se por isso pouco segura a generalização indiscriminada do emprego de qualquer dessas fórmulas para cada caso particular.

Com EINSTEIN 1950, o transporte sólido começou a ser tratado como um fenómeno aleatório em que a teoria estatística permite formular de modo diferente a previsão do caudal sólido. Posteriormente HUBBELL e SAYRE 1964 apresentam outra fórmula baseada também na teoria estocástica.

No entanto a aplicação de fórmulas com interesse prático, obtidas por esta via, está dependente de estudos futuros que segundo HUNG 1971, são os seguintes:

- Verificar as hipóteses, utilizadas por diferentes investigadores na derivação dos seus modelos a partir de funções de distribuição dos comprimentos dos saltos das partículas e dos períodos de repouso, por meio de ensaios sistemáticos.

- Empreender experiências suficientes sobre o movimento de partículas isoladas a fim de se determinarem as distribuições acima indicadas, relacionando-se com as características hidráulicas do escoamento e das formas de fundo.

- Investigar teoricamente os resultados obtidos nas experiências acima referidas.

- Desenvolver modelos estocásticos para escoamentos permanentes não uniformes.

4.2.2.3 - Modelos matemáticos de "produção de sedimentos".

A previsão da "produção de sedimentos" na bacia hidrográfica pode basear-se em modelos matemáticos que podem ser divididos nos grupos mencionados para os modelos de transporte sólido, i. e., modelos empíricos ou modelos fundamentalmente conceptuais e modelos determinísticos ou modelos estocásticos.

Neste relatório apresentam-se dois modelos que podem considerar-se representativos dos modelos utilizados para a previsão da "produção de sedimentos". Em a) apresenta-se o modelo da MEYER e WISCHMEIER 1969 incluído no grupo dos modelos conceptuais determinísticos. WISCHMEIER e SMITH 1962 e 1965 apresentam um modelo empírico determinístico. O modelo de NEGEV 1967 referido em b) também pode incluir-se no mesmo grupo embora seja mais elaborado.

a) Modelos de MEYER e WISCHMEIER 1969 e WISCHMEIER e SMITH 1962 e 1965.

Como se sabe, um dos processos erosivos consiste no arranque das partículas de solo e seu transporte pela acção do impacto das gotas da chuva e se quente escoamento superficial. Embora a erosão tenha também outras causas, esta é a melhor conhecida devido talvez a que foi estudada principalmente como problema dos terrenos agrícolas. E como são os solos aqueles que dão grande contribuição para o caudal sólido transportado pelos rios, comparativamente com outras formas de erosão, os modelos que se conhecem melhor dizem respeito à erosão de solos pela acção das gotas de chuva.

As taxas de erosão, isto é, as quantidades de solo erodidas por unidade de área, dependem fundamentalmente das características da chuva (velocidade de queda das gotas, distribuição das dimensões das gotas, energia de impacto), da erodibilidade do solo (função da porosidade, do grau de saturação), dos métodos de trabalho agrícola, da fase de crescimento da cobertura vegetal e da existência de obras de defesa dos solos.

MEYER e WISCHMEIER 1969, desenvolveram um modelo que, pode dizer-se, é obtido por via teórica embora para a sua aplicação a casos concretos haja ne

cessidade de se conhecerem os valores de várias constantes para o qual é imprescindível ter dados de observações. O modelo é constituído com base em quatro subprocessos independentes:

- E_P - Erosão provocada pela precipitação
- E_E - " " pelo escoamento superficial
- T_P - Capacidade de transporte da precipitação
- T_E - " " " do escoamento superficial.

Os cálculos processam-se para cada incremento do comprimento da vertente em estudo, segundo o esquema da Fig. 4.1.

Cada subprocesso é relacionado com vários parâmetros segundo as expressões seguintes:

$$E_P = K_{E_P} A_i P^2 \quad (4.1)$$

$$E_E = K_{E_E} A_i q^{2/3} i^{2/3} \quad (4.2)$$

$$T_P = K_{T_P} i P \quad (4.3)$$

$$T_E = K_{T_E} q^{5/3} i^{5/3} \quad (4.4)$$

Nas expressões, os vários K são coeficientes dependentes das características do solo, e os outros parâmetros são:

- i - inclinação do troço da vertente
- A_i - área do troço da vertente
- P - intensidade de precipitação horária
- q - caudal específico do escoamento superficial

WISCHMEIER e SMITH 1965, formularam por via empírica uma equação universal de perda de solos, principalmente para terrenos agrícolas. Os parâmetros são essencialmente os mesmos que são considerados no modelo atrás descrito,

mas neste caso o cálculo é simplificado à custa do tabelamento das várias constantes características.

A equação universal de perda de solos é

$$E = P \times K \times L \times I \times A \times C \quad (4.5)$$

onde

E - erosão, calculada por unidade da área num ano, (tons/acre)

P - factor de precipitação

K - factor de erodibilidade do solo

L - factor do comprimento da vertente

A - factor dos métodos agrícolas utilizados

C - factor das obras de defesa de solo, existente.

Por ser uma forma empírica dimensionalmente incorrecta, os valores de E calculados só serão válidos se se utilizarem as unidades indicadas nas tabelas.

O factor de precipitação, P, é apresentado para os Estados Unidos, onde o trabalho foi efectuado, num mapa onde são marcadas as linhas de igual P, desenhadas a partir do conhecimento dos valores do produto da energia cinética total de uma chuvada vezes a sua intensidade máxima em 30 minutos. Os valores variam de 100 a 600.

O factor erodibilidade do solo, K, mede a susceptibilidade de um solo para a erosão e é definido como a taxa de erosão por unidade de valor P para o caso do tipo de um solo continuamente arroteado com um comprimento de 22,1 m e uma inclinação de 90%. Os valores variam entre 0,7 para solos altamente erodíveis e menos de 0,1 para solos com grande infiltração, e encontram-se tabelados.

Os factores de comprimento, L, e de inclinação, I, são englobados num só, LI, expresso na fórmula:

$$LI = \lambda^{0,5} (0,0076 + 0,0053i + 0,00076i^2) \quad (4.6)$$

onde

λ - comprimento da vertente em pés

i - inclinação da vertente em %.

A expressão encontra-se na forma gráfica tendo em abcissas o comprimento da vertente, em ordenadas o factor LI, e um conjunto de curvas para os vários valores de inclinação. Os valores de LI variam entre 0 e 6.

O factor A procura ter em conta a influência que as várias fases dos trabalhos agrícolas e do desenvolvimento das plantas têm na erodibilidade do solo. O seu valor é igual à razão entre a taxa de erosão do solo em estudo e o solo tipo atrás definido.

Por último o factor C, toma em conta o efeito das obras de conservação de solos.

Pelos valores limites apresentados chega-se pois à conclusão que o valor máximo obtido pela equação é:

$$E = 600 \times 0,7 \times 6 = 2520 \text{ ton/acre} \approx 10,40 t_f/km^2$$

A erosão calculada pela equação (4.5) é válida para um ano médio devendo esperar-se perdas de solo muito mais elevadas em certos períodos ou pelo contrário valores mais baixos. Quando determinada zona não é homogénea dever-se-á dividi-la em zonas, somando-se no fim os valores obtidos em cada uma delas.

LANGBEIN e SCHUM 1968, apresentam as figuras 4.2 e 4.3 que dão os valores da erosão anual obtidas por meio da análise das observações, respectivamente, de estações de medição do caudal sólido e de levantamento de albufeiras. Ambas as curvas tem uma forma semelhante, tendo um máximo para uma precipitação anual de cerca de 330 mm. Os valores obtidos nas observações reali

zadas com albufeiras, duplos dos valores nas observações de caudal sólido, correspondem, segundo o autor, às diferentes dimensões das áreas médias das bacias hidrográficas observadas; como esta era para o caso das albufeiras cerca de 77 km^2 e para o caso das estações de medição cerca de 3860 km^2 , aplicando uma relação obtida por BRUNE 1948, tem-se $(3860/77)^{0,15} = 1,8$ que é aproximadamente igual a 2 como indicam as figuras 4.2 e 4.3.

É de esperar encontrar outras zonas curvas semelhantes, obtidas por via empírica, que podem fornecer elementos valiosos para a estimação da erosão numa bacia hidrográfica.

b) Modelo sedimentológico da Universidade de Stanford (NEGEV 1965).

Este modelo é conceptualmente, semelhante aos modelos apresentados em a) embora um pouco mais elaborado no que diz respeito aos processos erosivos e de transporte sólido, sendo utilizado na previsão do caudal sólido na secção do rio que define uma bacia hidrográfica.

Fundamentalmente o modelo simula registos de valores de transporte sólido a partir de dados de precipitação e de escoamento total e ainda a partir da simulação do escoamento superficial pelo modelo da bacia hidrográfica de Stanford (CRAWFORD e LINSLEY 1966).

O modelo é baseado em teorias e em factos já evidenciados pela experiência mas as equações realmente utilizadas no modelo são encontradas em cada cálculo particular por tentativas utilizando os registos dos dados hidrológicos existentes para a bacia em estudo. A sua aplicabilidade está assim dependente dum número maior de verificações do modelo em bacias com diversas características.

Os processos erosivos de transporte sólido utilizado no modelo são apresentados esquematicamente na figura 4.4. O ciclo sedimentológico pode ser sumariamente descrito como se segue:

As gotas de chuva ao incidirem no solo da bacia hidrográfica arranca partículas que são arrastadas pelo escoamento superficial. Este por sua vez também pode arrancar mais partículas além de transportar estas e as que foram arrancadas quando do impacto das gotas de chuva. É o que se chama erosão superficial, (podendo ser quantificada pela fórmula (4.5), a equação universal da perda de solos) que neste modelo é igual à soma de três parcelas: sedimentos de impacto das gotas de chuva, erosão provocada pelo escoamento superficial e sedimento proveniente das superfícies impermeáveis.

Quando o escoamento superficial atinge maiores proporções formam-se no terreno pequenas ranhuras longitudinais, as quais podem crescer dando origem à ravinação; destas formações saem mais sedimentos aumentando o transporte sólido geralmente na forma de transporte por arrastamento e de transporte em suspensão. Num estudo mais detalhado é necessário distinguir o material transportado segundo duas origens, material de fundo e material lavado ("wash load"). O material do fundo tanto pode ser transportado por arrastamento como em suspensão. Neste modelo ainda se considera outro conceito de transporte sólido, o "interload", constituído pelo material sólido que tem características comuns ao material lavado e ao material de fundo; é material lavado pela sua granulometria mas é material de fundo pela sua modalidade de transporte.

Na figura 4.5 apresenta-se o fluxograma do modelo com a indicação dos dados do modelo, da memorização, das equações e dos resultados, no qual se vê como o ciclo sedimentológico é simulado.

São considerados os dados iniciais, os ciclos de cálculo e os resultados.

Os dados iniciais são:

- um grupo de constantes seleccionadas que entram nas várias fórmulas de transporte sólido e de erosão
- registos diários de escoamento e de transporte sólido a partir dos

quais são simulados registos mais completos

- precipitação diária e horária
- escoamento superficial horário (calculado pelo modelo da bacia hidrográfica)

Por último os resultados impressos são:

- as constantes introduzidas
- cabeçalhos
- registo mensal dos valores, de transporte sólido lavado diário (calculados pelo modelo)
- registo mensal dos valores, de transporte sólido "interload" diário (calculados pelo modelo)
- totais mensais e anual das principais variáveis do programa, e do transporte total (calculados pelo modelo)
- gráfico cujas coordenadas são os valores do transporte sólidos diários calculado e medidos (em opção).

O modelo foi verificado em 2 bacias hidrográficas relativamente pequenas (210 km^2 e 550 km^2) e com uma precipitação de cerca de 700 mm. Dos resultados concluiu-se que:

- o modelo pode simular bastante bem o transporte sólido anual, mensal e até diário
- o modelo pode reproduzir, em média, a composição granulométrica das suspensões
- os erros dos valores anuais calculados diminuem quando aumenta o transporte sólido
- o modelo é uma boa simulação da erosão e do transporte sólido pelo menos na região verificada, estimando valores por baixo custo.

Por sua vez existem causas de erros que podem ser os seguintes:

- erros nos valores medidos (número insuficiente de verticais para definir a concentração média, caudais errados, etc.)

- equações imprecisas, principalmente a que dá o valor da erosão provocada pelo impacto das gotas de chuva

- falta de componentes específicas para a erosão de ravinas e escavação das margens

- falta de um adequado processo de cálculo da deposição na planície de inundação

- omissão dos efeitos sazonais nos processos de erosão e de transporte sólido.

Como se disse acima, aplicabilidade do modelo depende fundamentalmente da verificação do modelo em bacias com características diferentes, da utilização do modelo em bacias maiores (por meio da divisão em sub-bacias) e do aumento do número de dados disponíveis.

4.3 - Deposição dos sedimentos na albufeira

4.3.1 - Modelos físicos

4.3.1.1 - Modelos com fundo móvel formado por materiais sólidos incoerentes transportados por arrastamento

Os escoamentos fluviais, nos quais se inserem as barragens que originam as albufeiras, podem ser estudados em modelos físicos que podem ter ou não fundo móvel. Este último caso é utilizado quando se pretende estudar o regime aluvionar do leito do rio. Contudo convém frizar que, ao estudar o assoreamento das albufeiras utilizando modelos com fundo móvel constituído por material incoerente transportado por arrastamento, restringe-se o campo de aplicação do estudo porque a grande percentagem das albufeiras sofre importan

tes assoreamentos de material fino, que não tem tanta importância noutros problemas fluviais, mas que neste caso altera sensivelmente os resultados obtidos no modelo.

A correspondência entre os fenómenos ocorridos no protótipo e no modelo consegue-se desde que o modelo seja construído segundo determinadas condições impostas pela teoria da semelhança, sendo em geral, suficiente a igualdade de valores de certos parâmetros adimensionais característicos para cada tipo de fenómeno em estudo.

A utilização de parâmetros adimensionais deriva do facto de que estes não dependem do sistema de unidades, apresentando assim valores idênticos para fenómenos semelhantes mas que só diferem no valor absoluto das grandezas em jogo.

Nos fenómenos aluvionares há 4 grupos de parâmetros que os definem:

- Parâmetros que dizem respeito às profundidades físicas do fluido

Ex: $\left\{ \begin{array}{l} \rho - \text{Massa específica} \\ \nu - \text{Viscosidade} \end{array} \right.$

- Parâmetros que dizem respeito à natureza do material granular transportado.

Ex: $\left\{ \begin{array}{l} D - \text{Diâmetro efectivo (pode ser } D_{\text{méd}}, D_{35}, D_{50}, D_{65}, D_{90}) \\ \rho_s - \text{Massa específica do grão} \end{array} \right.$

- Parâmetros que dizem respeito à natureza do escoamento

Ex: $\left\{ \begin{array}{l} I - \text{Inclinação da superfície livre} \\ R - \text{Raio hidráulico} \\ g - \text{aceleração da gravidade} \end{array} \right.$

- Variáveis definidas da posição e do tempo

- x, y, z - Coordenadas espaciais

- t - Coordenada temporal

Com os parâmetros apresentados, ou com outros mais que não tenham sido indicados, são formados parâmetros adimensionais, com os quais se pode trabalhar no estudo experimental, quer considerando-os como variáveis do estudo, quer fornecendo relação entre as escalas do modelo que garantam a semelhança dos fenómenos a estudar.

Alguns parâmetros adimensionais mais utilizados são:

$$\text{Número de Froude } Fr = \frac{V}{\sqrt{gR}} \quad (4.7)$$

$$\text{Número de Reynolds } Re = \frac{VR}{\nu} \quad (4.8)$$

Número de Reynolds
relativo à velocidade

$$\text{do atrito junto ao fundo } Re_* = \frac{DV_*}{\nu} \quad (4.9)$$

$$\text{Número de Shields } \frac{V_*}{\gamma'_{sd}} \quad (4.10)$$

$$\frac{q_s}{\rho V_*^3} \quad (4.11)$$

$$\frac{V}{V_*} \quad (4.12)$$

em que

V - velocidade média do escoamento

V_* - \sqrt{gRI} - velocidade de atrito junto ao fundo

$\gamma'_{sd} = g(\gamma_s - \gamma)$ - peso específico submerso do material sólido

q_s - caudal sólido em peso por unidade de largura

e os outros símbolos têm o significado atrás indicado.

Nos estudos de assoreamento em modelo, como em todos os casos de estudo em modelo, é necessário obterem-se valores do protótipo, a partir dos quais poder-se-á escolher as escalas do modelo. No entanto existem problemas com a aplicação dos critérios de semelhança, pois que a teoria não permite ainda a

obtenção de resultados que possam ser antecipadamente considerados correctos, sendo necessária uma verificação dos fenómenos que ocorrem nos modelos para garantir a simulação do protótipo. Tal verificação chama-se taragem. Esta pode ser por vezes demorada sendo tanto mais difícil de executar quanto mais reduzido e distorcido for o modelo. Como, de um modo geral, a construção de uma barragem origina uma albufeira de apreciável comprimento, resulta que, para se estudar em modelo toda a zona da albufeira, é necessário reduzir consideravelmente as dimensões desta para que seja economicamente viável a construção do mesmo. No entanto devem manter-se as dimensões suficientes para se poderem obter resultados correctos. Uma redução exagerada das dimensões é ainda geralmente acompanhada de maior distorção, isto é, maiores valores da razão entre a escala dos comprimentos e a escala das profundidades do escoamento, considerando as escalas com valores superiores à unidade (razão entre os valores do protótipo sobre os valores do modelo).

Como em última análise se pretende estudar a quantidade e o modo como os sedimentos são retidos e depositados na albufeira, relacionam-se parâmetros relativos a estes depósitos com os vários parâmetros que influenciam o fenómeno, como sejam caudais afluentes, variações de nível da albufeira, etc. A exploração do modelo fornece resultados quantitativos e de distribuição espacial dos sedimentos depositados na albufeira, mas o conhecimento do tempo que foi necessário no modelo para que se forme determinada situação não é suficiente para se deduzir o tempo necessário para que a situação análoga se forme no protótipo. Na verdade a escala dos tempos, ou melhor as várias escalas dos tempos (do escoamento líquido, do transporte sólido, das variações aluvionares), não são bem conhecidas teoricamente e quando na taragem não se puder obtê-las, quer por falta de elementos do protótipo, quer porque as transformações sofridas pelo leito do rio sejam suficientemente profundas (como pode ser o caso do assoreamento das albufeiras) para que se preveja que não se man

tenham válidas as escalas de tempo, permanece uma indeterminação acerca da validade de extrapolação dos valores do tempo obtidos no modelo.

4.3.1.2 - Modelos com fundo móvel formado por materiais sólidos coerentes transportadas em suspensão

Segundo PARTHENIADES 1971, na actualidade não há método seguro de estudo em modelo do comportamento dos sedimentos finos, embora haja um conhecimento razoável das características de sedimentação relacionadas com as características hidráulicas do escoamento.

Na verdade enquanto que, no caso de se considerarem os fenómenos de transporte do material sólido por arrastamento, as forças predominantes em jogo são de natureza mecânica (inércia, turbulência,...) portanto mais fáceis de serem simuladas em modelo, no caso dos fenómenos de transporte sólido em suspensão há forças de natureza electroquímica cuja simulação envolve maiores dificuldades, tanto do ponto de vista da teoria da semelhança como do ponto de vista prático.

Quer os fenómenos de transporte, quer nos de erosão e deposição, o material fino apresenta propriedades de coesão que em grande parte são função da constituição química das partículas sólidas, tendo importância notável as partículas argilosas, cuja utilização em modelo apresenta por isso grandes problemas práticos.

Os estudos básicos de laboratório, alguns dos quais são efectuados conjuntamente com estudos de erosão, procuram descobrir os parâmetros principais, quer do escoamento, quer do material sólido, que definem o início, intensidade e velocidades de sedimentação das partículas finas. Os resultados obtidos por esses estudos ainda não permitem contudo uma exploração eficiente dos modelos que utilizem a fracção fina do material sólido.

Quanto aos parâmetros a utilizar, há certas diferenças em relação àque

les que são considerados no transporte por arrastamento. Assim no presente caso é preferível empregar a velocidade de queda das partículas, W , em vez do seu diâmetro efectivo e a concentração do material sólido, c , tendo ainda a temperatura, T , maior importância do que a que tem no transporte por arrastamento.

Segundo alguns autores, tais como SUMER 1970 e GOLE et al. 1971, que apresentam alguns parâmetros adimensionais com interesse no estudo de suspensões de material sólido e sua deposição, estes só devem ser utilizados em modelos sem distorção, o que restringe a aplicação no estudo global em modelo do assoreamento de albufeiras.

Em conclusão afirma-se que o estudo em modelo de assoreamento das albufeiras, considerando a fracção granulométrica mais fina, apresenta dificuldades, sendo eventualmente aplicável em estudos de assoreamentos localizados que permitam a construção de modelos com escala pequena. isto é, com relativamente pouca redução e não-distorcidos.

4.3.1.3 - Simulação das correntes de densidade

Como foi dito em 2.3.2, as correntes de densidade desempenham um importante papel no transporte e sedimentação da fracção fina do material sólido transportado pelo rio afluente à albufeira. Estas correntes são devidas a diferenças de densidade entre diversos estratos da massa de água contida na albufeira, resultantes da variação das concentrações de materiais finos, e poder-se-ão simular em modelo empregando líquidos com densidades diferentes devidas a variações de temperatura ou de composição química.

No entanto, tal estudo tem limitações no que diz respeito às conclusões sobre a sedimentação do material transportado em suspensão, mas pode fornecer dados sobre a mecânica dos escoamentos estratificados em geral.

Segundo a ASCE 1968, a caracterização completa das correntes de densida

de consiste em:

- Determinação da velocidade inicial, profundidade e caudal sólido das correntes de densidade a partir das características conhecidas do rio afluente e da albufeira.

- Determinação da mistura interfacial das correntes de densidade e a água da albufeira, que dá origem a uma diminuição da capacidade de transporte das mesmas e conseqüente deposição do material sólido.

- Determinação dos processos de manutenção das correntes de densidade, com o objectivo de prover a barragem com órgãos de descarga apropriados.

No protótipo o escoamento é complexo devido a um ou mais dos seguintes factores:

- Geometria da bacia da albufeira
- Distribuições complexas dos vários parâmetros no escoamento afluente
- Sobreposição do escoamento de cheias sobre as correntes de densidade
- Variação contínua no tempo da densidade de escoamento afluente.

Como já foi dito, a simulação dos fenómenos aluvionares da fracção fina, transportada pelas correntes de densidade, apresenta dificuldades. Assim no estudo de correntes de densidade, em primeira aproximação podem-se pretender apenas as características mais gerais dos escoamentos. A semelhança dos fenómenos nos modelos utilizados é conseguida, de modo análogo aos restantes tipos de modelos, à custa da igualdade de parâmetros adimensionais. Neste caso os parâmetros diferem ligeiramente dos já apresentados, pois as causas dos movimentos são um pouco diferentes.

Assim o número de Froude pode apresentar a forma designada por número de Froude densimétrico

$$F_d = \frac{V}{\sqrt{g \frac{\Delta \rho}{\rho} R}} \quad (4.13)$$

e aparecem outros parâmetros, como por exemplo o número de Froude-Reynolds

densimétrico

$$F_d Re = \frac{\sqrt{g \Delta \rho R}}{\rho} = \frac{V_d R}{\nu} \quad (4.14)$$

O valor de $g \frac{\Delta \rho}{\rho}$ é a aproximação da expressão mais correcta

$$g \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{\rho_1} \quad (4.15)$$

em que ρ_1 é a massa específica do líquido mais denso e ρ_2 a do líquido menos denso.

Finalmente refere-se que as correntes de densidade nas albufeiras não são apenas as que resultam da influência de águas turvas, com maior importância no assoreamento, mas também, as que resultam da estratificação resultante da influência de temperatura. Esta última tem importância na exploração da albufeira porque permite uma tomada de água a diversos níveis com características físicas diferentes, com importância na utilização da água armazenada para irrigação, para abastecimento, etc.,

4.3.1.4 - Modelos analógicos aerodinâmicos

Qualquer modelo para o estudo do assoreamento de uma albufeira que utilize água como fluido exige uma profundidade mínima de escoamento para que se possam efectuar medições. Geralmente existe acentuada distorção não impedindo no entanto que os modelos construídos sejam grandes devido às grandes dimensões das albufeiras. Portanto esses modelos exigem instalações grandes e por consequência são muito caros.

Segundo a teoria da semelhança não é obrigatoriamente necessário empregar exclusivamente a água como fluido, havendo até vantagem na utilização de outros fluidos, mais ou menos densos, mais ou menos viscosos, que permitissem maior liberdade na escolha das escalas. Por motivos económicos ou práticos é no entanto muito difícil utilizar outro líquido que não seja a água; no entan

to poder-se-á utilizar o ar, que devido à sua facilidade de obtenção, torna substancialmente económica a exploração de modelos.

O escoamento da água no protótipo dá-se com superfície livre; com o ar esse escoamento tem de se dar em pressão, no qual a superfície livre no protótipo é simulada por meio de uma placa com uma inclinação apropriada.

A teoria da semelhança para este tipo de simulação é controversa, não havendo uma unanimemente aceite. Sendo este método de estudo mais utilizado nos países da Europa Oriental, a grande parte da bibliografia está escrita em línguas eslavas de difícil acesso. Um dos artigos em língua acessível é o de KOMORA e SUMBAL 1965, em que são analisadas as condições de semelhança e é descrita uma instalação experimental para o estudo de sedimentação de suspensões numa albufeira do Iraque.

Os modelos são usualmente montados numa mesa. A escala pode ser muito grande, da ordem de $\lambda_L = 4000$ sendo a distorção da ordem de $n = 4$, e com uma redução muito maior do que a utilizada nos modelos hidráulicos em que não se vai muito além de $\lambda_L = 200$. A topografia pode ser modelada com vários materiais, impermeáveis ou impermeabilizados, como sejam a madeira, o gesso, a plasticina, etc. O escoamento de ar é gerado com um ventilador que pode ser colocado na parte de montante ou na de jusante, criando respectivamente sobre ou subpressões no interior do modelo. Nos estudos com transporte sólido, é necessária a presença de dispositivos de alimentação de material sólido, o qual pode ser a serradura de madeira, farinha, etc., havendo grande liberdade de escolha pois que há pouca influência dos fenómenos químicos entre as partículas e fluído.

Pode pois concluir-se que os modelos aerodinâmicos têm vantagem de serem mais económicos e expeditos que os modelos hidráulicos, sendo úteis numa primeira análise do fenómeno global, não dispensando no entanto a utiliza

ção de modelos hidráulicos, principalmente em aspectos de pormenor. Os aspectos de pormenor são estudados já com conhecimento das características globais obtidas no modelo aerodinâmico, LNEC 1973.

Por último acentua-se que a utilização dos modelos aerodinâmicos ainda está limitada devido à insuficiência de uma teoria de base, por um lado, e à falta de tradição por outro lado.

4.3.2 - Modelos matemáticos

4.3.2.1 - Modelos matemáticos da sedimentação nas albufeiras

A obtenção de modelos matemáticos que descrevam a sedimentação apresenta grandes dificuldades. Na verdade, a sedimentação pode ser considerada como uma incapacidade de o rio poder transportar o material sólido que estava sendo arrastado ou se encontrava em suspensão. Sendo assim é natural que se possa tratar matematicamente a sedimentação com as fórmulas de transporte sólido, embora considerando-as sob o novo ponto de vista e adaptando-as.

Como se viu, as fórmulas de transporte sólido, de um modo geral, relacionam parâmetros relativos ao caudal sólido com parâmetros relativos ao escoamento líquido. Pode-se assim, a partir do conhecimento da variação das características do material transportado, calcular a capacidade actual de transporte e por conseguinte verificar se o material se deposita ou não.

Evidentemente que no estudo da sedimentação também se distinguem os casos de transporte por arrastamento e de transporte em suspensão. A importância de cada um dos tipos de transporte pode variar de estudo para estudo, consoante o rio e o regime hidrológico.

Se o rio transporta material com granulometria grossa e fina, este, na albufeira, deposita-se de modo a que as partículas finas ficam perto da barragem. Há necessidade, neste caso, de considerar a sedimentação das partículas grosseiras, geralmente arrastadas no fundo, e a sedimentação de partí-

culas finas, na maior parte das vezes transportadas em suspensão.

Como em grande percentagem dos casos, o volume de materiais finos depositados nas albufeiras é uma fracção apreciável de volume total dos depósitos, analisa-se com mais detalhe um modelo de sedimentação aplicável a escoamentos com suspensões, mas que pode ser formalmente equivalente a um modelo aplicável a escoamentos com transporte sólido por arrastamento.

Antes de se referir propriamente o modelo, faz-se lembrar que o caudal sólido em suspensão pode de uma maneira geral ser expresso pela fórmula

$$q_{ss} = \int_a^H c(y) u(y) dy \quad (4.16)$$

em que

q_{ss} - caudal sólido em suspensão por unidade de largura do escoamento

$c(y)$ - concentração média de água num segmento, com largura unitária, à distância y de fundo

$u(y)$ - velocidade média desse mesmo segmento

a - distância do fundo a partir da qual é mensurável a concentração

H - profundidade do escoamento

Um dos modelos matemáticos existentes, que procuram descrever os fenómenos de sedimentação, é o de KARASHEV 1964. Este autor considera como ponto de partida, baseando-se na experiência e em vários trabalhos teóricos, que a distribuição da concentração de material sólido em suspensão (turbulência) numa vertical e para sedimentos de granulometria uniforme é dada pela expressão exponencial

$$S = S_H e^{-NG^* (1-\bar{y})} \quad (4.17)$$

onde

S - concentração da água à profundidade \bar{y}

$$\left(S = \frac{m^3 \text{ de material sólido}}{m^3 \text{ de mistura (água e sedimento)}} \right)$$

S_H - concentração da água perto do fundo

N - parâmetro adimensional dependente de coeficiente de Chézy (C), e da aceleração da gravidade (g)

G^* - razão entre velocidade de queda das partículas (w) e valor da velocidade média (V) de escoamento líquido, numa vertical

\bar{y} - Profundidade relativa igual à razão entre a profundidade de um ponto na vertical (y) e a altura do escoamento (H).

O valor de S_H é

$$S_H = \bar{\Phi} S_{upw} \quad (4.18)$$

em que

S_{upw} - concentração do "upwash", isto é, da porção do escoamento que está junto ao fundo. É função da velocidade no fundo, de V e da altura H do escoamento.

$\bar{\Phi}$ - função tabelada dependente de $\epsilon = \frac{w}{\bar{U}'}$ (RAZUMIKHINA 1966) sendo w a velocidade de queda das partículas e \bar{U}' a média da componente turbulenta da velocidade

E o valor de N é

$$N = \frac{2mC}{g} \quad (4.19)$$

onde

$$m = 0,35 C+3$$

C - coeficiente de Chézy

g - aceleração da gravidade

Seguidamente o autor considera a variação no tempo da concentração média numa vertical, do material sólido em suspensão, e a variação no espaço

num determinado instante, possibilitando assim representar o aspecto dinâmico do transporte.

A fórmula que dá o valor da concentração (S) numa vertical num dado local é:

$$S = S_{med} + (S_{inic} - S_{med}) \exp\left(-\frac{w+K}{q} t\right) \quad (4.20)$$

S_{med} - concentração média de transporte sólido ($S_{med} = B^* S_{upw}$)

S_{inic} - " " " na vertical no instante $t=0$ (pode ser $S_{inic} = 0$)

w - velocidade de queda das partículas

K - parâmetro com a dimensão de uma velocidade que depende da velocidade do escoamento, da função Φ atrás referida e de outra função B^*

q - caudal líquido do filete que passa pela vertical

$$K = \frac{w \Phi B^*}{1 - \Phi x} \quad (4.21)$$

B^* - função dependente do coeficiente de Chézy e de $\frac{w}{V}$ encontra-se tabelada em RAZUMIKHINA 1966, sendo V a velocidade média do escoamento do filete.

De modo análogo a (4.20), a concentração num determinado instante é dada pela fórmula:

$$S = S_{med} + (S_{inic} - S_{med}) \exp\left(-\frac{w+K}{q} x\right) \quad (4.22)$$

As equações (4.17), (4.20) e (4.22), que neste exemplo são exponenciais, podem segundo outros autores, apresentar outras expressões, mantendo-se válido o cálculo subsequente.

No passo seguinte considera-se a difusão da água turva, que analiticamente pode ser apresentada pela expressão diferencial:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + v \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{g}{f} A_m \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) \quad (4.23)$$

onde além dos parâmetros já referidos aparecem ainda

A_m - coeficiente de trocas turbulentas

γ - peso específico da água

x - coordenada espacial segundo a direcção do escoamento

z - " " " " " " perpendicular ao escoamento

$$A_m = \frac{q^*}{2mC} \quad (4.24)$$

em que

q^* - caudal por unidade de largura

$$m = \begin{cases} 0,35 C + 3 & 10 \leq C \leq 60 \\ 24 & C > 60 \end{cases}$$

C - coeficiente de Chézy, $C = 33\left(\frac{H}{d}\right)^{1/6}$

A expressão (4.23) pode no entanto apresentar-se com uma forma mais simples se se considerar um referencial animado da velocidade V .

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{g}{\gamma} A_m \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x_*^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z_*^2} \right) \quad (4.25)$$

A solução desta equação pode ser obtida pelo método das diferentes finitas, no qual (4.25) toma a nova forma (ver notações da Fig.4.6).

$$\frac{S_{K+1,n,m} - S_{K,n,m}}{\Delta t} = \frac{gA_m}{\gamma} \left(\frac{S_{K,n+1,m} + S_{K,n-1,m} - 2S_{K,n,m}}{\Delta x_*^2} + \frac{S_{k,n,m+1} + S_{k,n,m-1} - 2S_{k,n,m}}{\Delta z_*^2} \right) \quad (4.26)$$

ou ainda considerando

$$\Delta x_* = \Delta z_* \quad (4.27)$$

$$b = \frac{gA_m \Delta t}{\gamma \Delta x_*^2} \quad (4.28)$$

vem

$$S_{k+1, n, m} = b(S_{k, n+1, m} + S_{k, n-1, m} + S_{k, n, m+1} + S_{k, n, m-1}) + (1-4b) S_{k, n, m} \quad (4.29)$$

Dando a b o valor $\frac{1}{4}$, tal que

$$\Delta t = \frac{\Delta x_*^2}{4gA_m} \quad (4.30)$$

tem-se finalmente

$$S_{k+1, n, m} = \frac{1}{4} (S_{k, n+1, m} + S_{k, n-1, m} + S_{k, n, m+1} + S_{k, n, m-1}) \quad (4.31)$$

Com esta equação deduzida teoricamente e conhecendo-se as condições de fronteira, podem ser calculadas as turvações existentes num dado instante em determinado local.

Devido à heterogeneidade da granulometria dos sedimentos, os cálculos devem ser efectuados para uma determinada gama de dimensão dos sedimentos podendo-se somar os resultados parciais a fim de se obter o valor global da turvação num local:

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.32)$$

onde

S_i - concentrações da água considerando a fracção i da granulometria das partículas

n - número de fracções em que se dividiu os sedimentos.

Para se calcular a deposição do material transportado é, por último, necessário considerar a equação da continuidade do material sólido. Segundo KARASHEV 1964.

$$q_{sf} = (w+K)S - KS_{upw} \quad (4.33)$$

em que

q_{sf} - caudal sólido por área do leito

$$\left(q_{sf} = \frac{m^3 \text{ de material sólido}}{m^2 \cdot s} = \frac{m}{s} \right)$$

e as outras variáveis têm o mesmo significado das expressões anteriores.

Considerando o valor q_{sf} de cada quadrado indicado na figura 4.6, a variação da altura do depósito será dada por

$$\Delta h = \frac{q_{sf} \Delta t}{1 - n_t} \quad (4.34)$$

onde

Δh - variação da altura do depósito (m)

n_t - porosidade do terreno

Logo se $q_{sf} < 0$, isto é, se as partículas são retiradas do solo, $\Delta h < 0$ ou, se pelo contrário, $q_{sf} > 0$, então $\Delta h > 0$ e há deposição.

Analisando o modelo apresentado, pode concluir-se que:

- Partiu-se de uma fórmula de transporte em suspensão, em que intervêm parâmetros geométricos, hidráulicos, granulométricos e em que figuram constantes obtidas por experimentação ou observação da natureza;

- Consideraram-se as leis de variação das concentrações médias numa vertical quer em relação ao espaço quer em relação ao tempo;

- Exprimiu-se analiticamente a difusão da concentração de material sólido na água, por meio de uma equação diferencial.

- Por fim, foi considerada a lei da continuidade do material sólido, que juntamente com as anteriores, permite calcular a deposição ocorrida em dado local.

É claro que se pode construir outro modelo, com diferenças substanciais, seguindo as mesmas alíneas indicadas, porque as fórmulas de transporte podem ser diferentes, assim como a lei de variação da concentração média de uma ver

tical e a formulação da difusão.

O assoreamento das albufeiras pode ser simulado analiticamente por meio de modelos de sedimentação adaptados para este caso. Aproveitando o exemplo de modelo de sedimentação acima apresentado, mostra-se seguidamente o esquema de cálculo de assoreamentos de uma albufeira, segundo KARAUSHEV 1965:

a) Preparação inicial dos dados

- Traçado das curvas de frequência do caudal sólido do rio
- Seleção dos anos considerados no cálculo (podem ser três: um ano húmido, um ano médio e um ano seco) e dos intervalos de tempo mais indicados para o cálculo em cada tipo de ano.

b) Divisão da albufeira em sectores* (quadriculado de base para o cálculo por diferenças finitas).

- Cálculo dos valores que entram nas fórmulas (em todos os Δt e sectores).
- Traçado de gráficos auxiliares para cada sector.
- Gráficos de caudais característicos, profundidades médias, coeficientes de Chézy em função do nível da albufeira.

c) Traçado das curvas de superfície livre para todos os Δt , curvas que dependem do caudal líquido afluente e do nível da água na albufeira.

d) Cálculo da sedimentação e da nova forma do perfil longitudinal do fundo da albufeira (Ver fórmulas (4.29) e anteriores).

* - A albufeira pode ser dividida em 4 ou 8 sectores, dependendo o número da sua forma, e tendo em conta que as zonas de circulação não são consideradas como escoamento principal mas sim como particularidades.

Este valor Δt pode ser maior, no estio, ou menor na ocasião das cheias.

Os sedimentos são divididos em 3 ou 4 fracções granulométricas, obtendo-se o valor global pela soma dos valores parciais de cada fracção.

e) Correção dos gráficos indicados em b), como uma mudança de ordenadas de acordo com a mudança da altura média do fundo da albufeira causada pela sedimentação.

f) Traçado de novas curvas de superfície livre tendo em conta as mudanças devido à sedimentação.

g) Obtenção de novos valores da composição granulométrica do fundo que são necessários para o cálculo da turvação S_{upw} (os valores podem permanecer idênticos se a deformação for pequena).

h) Determinação da sedimentação num novo período Δt .

E assim por adiante repetem-se em passos d), e), f), g) e h) as vezes suficientes para atingir o assoreamento completo ou parcial da albufeira, obtendo-se por fim o tempo necessário para que tal aconteça.

Este tipo de modelo matemático, bastante complexo e exigindo grande número de elementos, pode ser baseado em qualquer outra formulação teórica que tenha como finalidade a obtenção de valores relativos às mesmas grandezas consideradas. A complexidade do modelo permite incluir grande número de parâmetros na sua utilização, o que é vantajoso quanto à fidelidade de simulação do assoreamento, mas em contrapartida é necessário ter-se um conhecimento detalhado da albufeira e da bacia hidrográfica que a alimenta para se poder prever o assoreamento o que dificulta a sua utilização.

4.3.2.2 - Modelos matemáticos simples do assoreamento das albufeiras

Quando não existem dados, quando se está nas primeiras fases de projectos ou quando se trata de obras pouco importantes, não se utilizam os modelos complexos acima mencionados. Nestes casos podem utilizar-se métodos de previsão mais expeditos. Os modelos então utilizados são, geralmente, o resulta

do da análise de dados obtidos na observação de um maior ou menor número de albufeiras com vários anos de vida. Embora não apresentem a flexibilidade dos modelos do tipo atrás indicado dão a primeira indicação da eventual importância dos assoreamentos esperados.

Como exemplo de modelos matemáticos simples baseados na análise estatística de observação das albufeiras existentes, apresentam-se seguidamente alguns modelos que dizem respeito, respectivamente, à previsão da quantidade de sedimentos retida na albufeira, ao modo de distribuição dos volumes de depósito e à definição do perfil da deposição dos sedimentos. Antes de apresentar tais modelos chama-se a atenção que em todos eles é necessário o conhecimento do caudal sólido afluente. Ora, na prática, desconhece-se em geral esse caudal sólido, o que dificulta uma previsão fundamentada.

a) Capacidade de retenção de uma albufeira

A capacidade de retenção de uma albufeira é a percentagem do total de sedimentos afluente que nela ficam retidos.

Os principais factores de que depende a capacidade de retenção são a geometria, a velocidade de queda de sedimentos e o caudal líquido que atravessa a albufeira. Por sua vez a velocidade de queda dos sedimentos depende da dimensão e a forma da partícula e da viscosidade e composição química da água enquanto que o caudal líquido que atravessa a albufeira depende do caudal afluente, de armazenamento existente e do caudal descarregado.

BORLAND 1971, apresenta três modelos empíricos que estimam a capacidade de retenção de albufeiras; são eles os de CHURCHILL 1948, de BRUNE 1953 e de EINSTEIN 1965.

- Modelo Churchill

Utilizando os dados sobre assoreamentos das albufeiras do Tennessee Valléy

Authority o autor relacionou num gráfico a percentagem dos sedimentos que atravessam a albufeira e um determinado coeficiente a que chamou índice de sedimentação.

Para a definição desse coeficiente é necessário dar o significado dos seguintes termos:

Capacidade - Capacidade da albufeira no nível médio da operação no período de tempo considerado.

Afluência - Caudal líquido afluente médio diário durante o período.

Período de retenção - Capacidade (m^3) dividida pela afluência (m^3/s).

Comprimento - Comprimento da albufeira em m no nível médio de operação.

Secção transversal média - Área que se obtém dividindo a capacidade pelo comprimento.

Velocidade média - Velocidade (m/s) obtida dividindo a afluência pela secção transversal média.

O coeficiente considerado, chamado índice de sedimentação, é igual ao período de retenção dividido pela velocidade média.

O gráfico apresenta-se na Fig. 4.7

Como exemplo de cálculo tem-se

Capacidade da albufeira $C = 1951,5 \text{ hm}^3$

Afluência $Q = 48\,881 \text{ hm}^3/\text{ano}$

Comprimento da albufeira $L = 63\,360 \text{ m}$

Efectuando-se os cálculos:

$$C = 1951,5 \text{ hm}^3 = 1951,5 \times 10^6 \text{ m}^3$$

$$Q = 48\,881 \text{ hm}^3/\text{ano} = 1550 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Período de retenção } \frac{C}{Q} = \frac{1951,5 \times 10^6}{1550} = 1,259 \times 10^6 \text{ s}$$

$$\text{Área da secção transversal média } A = \frac{C}{L} = \frac{1951,5 \times 10^6}{63\,360} = 30\,800 \text{ m}^2$$

$$\text{Velocidade } V = \frac{Q}{A} = \frac{1550}{30\,800} = 0,0503 \text{ m/s}$$

$$\text{Índice de sedimentação } I = \frac{\text{Período de retenção}}{\text{velocidade média}} = \frac{1,259 \times 10^6}{0,0503} = 25,03 \times 10^6 \text{ s}^2/\text{m}$$

Finalmente da Fig. 4.7, obtêm-se o valor da percentagem de sedimento que passa através da albufeira que é cerca de 9% tendo-se por último a

$$\text{Capacidade de retenção} = 100 - 9 = 91\%$$

- Modelo de Brune

Neste modelo o autor considera os dados obtidos em 44 albufeiras de exploração normal não considerando as albufeiras para controle de cheias e as albufeiras semi-secas.

A capacidade de retenção é relacionada com a razão entre a capacidade da albufeira e a afluência anual, segundo o gráfico da Fig. 4.8.

O exemplo de cálculo referente à mesma albufeira é então:

$$\frac{C}{Q} = \frac{1951,5 \text{ hm}^3}{48\ 881 \text{ hm}^3} = 0,0399$$

A figura 4.8 dá como capacidade de retenção um valor compreendido entre 64 e 83% em lugar dos 91 encontrados segundo o modelo anterior.

- Modelo de Einstein

Este modelo baseado em considerações teóricas tem em conta duas equações; uma é a equação que dá o tempo necessário para a concentração da água ficar reduzida a metade.

$$T = 0,657 \frac{H}{w} \quad (4.35)$$

onde H é a profundidade de escoamento em m, w é a velocidade de queda das partículas em m/s e $\frac{1}{2}$ um coeficiente de valor 1 no caso das albufeiras. A outra equação dá a percentagem do material depositado no comprimento l da bacia de

sedimentação sendo L o comprimento do canal sobre o qual se deposita metade dos sedimentos

$$p = 1 - \exp(-0,693 \ l/L) \quad (4.36)$$

Por meio de várias modificações matemáticas, Einsttein chega à fórmula

$$p = 1 - \frac{\exp(VH)}{1,055 \ lw} \quad (4.37)$$

que calcula a percentagem de material depositado da fracção granulométrica com velocidade de queda w. A média ponderada das quantidades obtidas para cada uma das fracções granulométricas fornece o valor global da deposição.

Teoricamente, a capacidade de retenção diminui progressivamente com o tempo sendo ainda conveniente analisar incrementos de tempo com o mínimo de 10 anos porque a variação anual da afluência introduz anomalias se se considerar períodos menores de tempo.

b) Assoreamento da parte de montante da albufeira

Como mostra a figura 2.2 os sedimentos grosseiros depositam-se na parte mais a montante da albufeira elevando o fundo do primitivo rio. A nova inclinação do fundo pode ser estimada pelo cálculo da inclinação a que corresponde o início de arrastamento, através das fórmulas de transporte sólido como sejam as fórmulas de Meyer-Peter e Müller ou de Schoklitsh. No entanto, empiricamente chegou-se à conclusão de que em média a nova inclinação é aproximadamente metade da inclinação inicial.

A localização do ponto onde a inclinação dos depósitos muda bruscamente depende da variação do nível da água na albufeira. Em albufeiras de exploração normal pode considerar-se localizado à cota da superfície de nível médio

de exploração, no entanto, se as condições são muito variáveis é difícil de definir tal ponto.

A observação da inclinação maior de depósitos de sedimentos grosseiros mostrou, segundo o Bureau of Reclamation, que é de cerca de 6,5 vezes maior do que a inclinação da parte mais suave.

Com estes valores pode ser calculado o volume dos depósitos, utilizando por exemplo o método da área média (ver 3.2.2.3). Este volume de depósitos deve ser igual ao volume dos sedimentos afluentes com as dimensões de areias. As diferenças encontradas podem ser eliminadas considerando novas inclinações ou nova localização do ponto de inflexão, até se conseguir uma boa concordância dos dois valores.

c) Distribuição dos sedimentos na albufeira

O modo como os sedimentos depositados se distribuem está dependente de muitos e inter-relacionados factores entre os quais estão a dimensão e natureza das partículas, a relação entre os caudais afluentes, dimensão e forma da albufeira, regime de exploração, etc... Geralmente a deposição começa pelas mais grosseiras que ficam na parte de montante da albufeira, enquanto as mais finas são transportadas pelas correntes de densidade até à barragem (ver Fig. 2.2).

Os modelos de sedimentação que foram apresentados fornecem resultados de relativa confiança mas também é possível obter em primeira aproximação a distribuição dos sedimentos por intermédio de modelos empíricos baseados nos elementos obtidos na observação da albufeira assoreadas.

O Bureau of Reclamation dos E.U.A. utiliza um modelo para determinar a distribuição dos sedimentos, designado "Método Empírico da Redução de Área" e que, por ser o mais completo que se conhece, é apresentado como exemplos de cálculo para uma albufeira (BORLAND 1971).

- Dados iniciais

Capacidade da albufeira - 671 hm³

Cota a que foi medida a capacidade - 889,6 m

Quadro com valores da área da superfície de nível e da capacidade da albufeira em função das cotas (Quadro 4.1)

Estimativa do sedimento retido em 50 anos - 93 hm³

- Classificação do tipo de albufeira

O tipo de albufeira é definido através do traçado gráfico em papel logarítmico da relação entre os valores da profundidade na barragem e as respectivas capacidades como mostra a Fig. 4.9. Geralmente a figura resultante é uma recta podendo eventualmente ser constituída por 2 troços com inclinações diferentes. O inverso da inclinação da linha obtida indica o tipo de albufeira, segundo uma classificação arbitrada conforme se apresenta na figura 4.10. As curvas que mostram um rápido crescimento da capacidade com a profundidade indicam albufeiras com um vale largo enquanto que se o crescimento for menor a albufeira é do tipo de vale encaixado. Quando houver dúvida sobre o tipo que deve ser considerado, quer porque a inclinação da linha é muito próxima dos valores limites considerados na divisão dos tipos, quer porque a linha é quebrada, ter-se-á optar por um dos tipos ou efectuar dois cálculos, um para cada tipo.

No exemplo apresentado na Fig. 4.9, a linha obtida tem dois traços mas como de maior extensão tem um valor de n (inverso da inclinação) igual a 3,3, considera-se, para efeitos de cálculo que a albufeira pertence ao tipo II.

- Cálculo da cota atingida pelos sedimentos junto à barragem

O cálculo da cota atingida pelos sedimentos junto à barragem utilize a figura empírica, Fig. 4.12, que relaciona a profundidade relativa com a função h' , definida adiante e determinada por observação do assoreamento de várias albufeiras.

O quadro 4.2, que mostra o cálculo para o exemplo apresentado, é constituído pelas colunas com os valores respectivos de:

coluna 1 - cotas arbitradas.

coluna 2 - profundidades relativas (p) obtidas pela razão entre a diferença da cota arbitrada com a cota mínima e a profundidade máxima (esta última no exemplo é $H_{\max} = 50,6 \text{ m} = 889,6 - 839$).

coluna 3 - capacidade da albufeira (V) à cota da coluna 1, (valor extraído do quadro 4.1).

coluna 4 - diferença entre o valor total de sedimento afluente estimado e a capacidade da albufeira considerada na coluna 3 (S-V), no exemplo $S = 93 \text{ hm}^3$).

coluna 5 - produto da profundidade máxima (Hmax) pela área da superfície de nível correspondente à cota arbitrada (sendo a área extraída do quadro 4.1)

coluna 6 - função definida pelo cociente dos valores da coluna 4 pelos valores da coluna 5

$$h' = \frac{S-V}{H.A} \quad (4.38)$$

A partir do conhecimento dos valores obtidos no quadro 4.2, e da figura empírica que relaciona a função h' com a profundidade relativa p, pode-se então determinar o valor pretendido p_0 que corresponde à intersecção da linha definida pelos pontos arbitrados e a linha definida empiricamente para cada um dos 4 tipos de albufeira, Fig. 4.12.

No exemplo apresentado $p_0 = 0,237$, a que corresponde uma altura de sedimentos, junto à barragem, de $H_s = 0,237 \times 50,6 = 12 \text{ m}$: ou seja a cota mínima do fundo da albufeira passará a ser, ao fim dos 50 anos, de $839 + 12 = 851 \text{ m}$.

No caso de a linha obtida 4.11 com os valores h' do quadro 4.2 não interceptar a curva empírica da Fig. 4.12, a cota a que ficarão os sedimentos

junto à barragem pode ser estimada por meio de uma fórmula, designando-se este método "Método do Incremento de Área".

A fórmula é

$$\dot{S} = A_0 (H - y_0) + V_0 \quad (4.39)$$

onde

S - valor estimado do volume de sedimentos retidos na albufeira em determinado período

V_0 - volume dos sedimentos abaixo da cota máxima (y_0) atingida pelos sedimentos junto à barragem

A_0 - Área inicial à cota y_0

Na figura 4.11 a linha tracejada corresponde a representação gráfica de equação (4.39) por onde se pode ver que a fórmula exprime a constância das áreas de deposição através de toda a altura da albufeira.

Com a resolução da equação (4.39) obter-se-ão os valores de y_0 , A_0 e V_0 procurados.

- Cálculo de distribuição dos sedimentos na albufeira

Conhecido o valor atrás indicado pode proceder-se ao cálculo da distribuição dos sedimentos seguindo as indicações das colunas do quadro 4.3. Ter-se-á:

1º - Completar as colunas 1, 2 e 3 com os valores dados pelo quadro 4.1, ou seja, os valores da área da superfície livre e da capacidade da albufeira

2º - Cálculo da profundidade relativa conforme se disse na coluna 2 do quadro 4.2.(Coluna 4).

3º - Leitura da área relativa, correspondente à profundidade relativa, na figura empírica, Fig. 4.12 que tem curvas, cada uma das quais diz respeito a um dos tipos de albufeira atrás definidas. (coluna 5).

4º - Cálculo de K (no fundo do quadro) dividindo a área da superfície de nível da albufeira, à cota do nível de sedimentos junto à barragem no fim do período considerado (50 anos), pela área relativa respectiva ($1,9/0,975 = 2,02$).

5º - Determinação da área das superfícies de nível dos sedimentos (coluna 6), multiplicando a área relativa (coluna 5) pelo valor K atrás determinado.

6º - Cálculo dos volumes de sedimentos (colunas 7) utilizando o método da área média (ver 3.2.2.3).

7º - A soma da coluna 7 deve igualar o valor estimado do sedimento retido na albufeira (Neste caso 93 hm^3). No exemplo a soma da primeira tentativa deu o valor $92,1 \text{ hm}^3$. Neste caso calcula-se novo $K' = 2,02 (93/92,1)$ repetindo-se os cálculos 5 a 7. A coluna 8 é obtida pela soma, a contar de baixo, dos sucessivos valores da coluna 7.

8º - A área da superfície de nível corrigida (coluna 9) é obtida pela diferença entre a área inicial (coluna 2) e a área dos sedimentos (coluna 6).

9º - De modo semelhante, a capacidade corrigida (coluna 10) obtém-se subtraindo à capacidade inicial (coluna 3) o volume dos sedimentos depositados (coluna 8).

10 - Por último podem ser traçadas as curvas corrigidas e iniciais das áreas da superfície de nível e da capacidade da albufeira, Fig.4.13 (a figu-

diz respeito a valores diferentes dos considerados nos cálculos precedentes).

- Definição do perfil da deposição dos sedimentos

Num cálculo mais completo pode ser tentada a definição da nova topografia da albufeira.

1º - Tomam-se os dados iniciais da topografia considerando a planta 4.14 e o perfil longitudinal, Fig. 4.15.

2º - Conhecem-se as curvas corrigidas da área da superfície de nível e da capacidade da albufeira, Fig. 4.13, obtidas no quadro 4.3.

3º - Reduzem-se, na planta inicial, as áreas a determinadas cotas, aproveitando os valores obtidos no quadro 4.3, coluna 6. Podem ser necessárias várias tentativas até se obterem as áreas a tracejado indicadas na Fig.4.14.

4º - Com a nova planta obtem-se o perfil corrigido da Fig.4.16. No exemplo o perfil é um pouco diferente do tipo apresentado na figura 2.2, mas como já foi dito a deposição dos sedimentos depende de muitos factores e a distribuição dos sedimentos é muito variável, além do que este tipo de cálculo apresentado é pouco rigoroso.

4.3.3 - Modelos matemáticos de previsão do peso específico dos sedimentos depositados nas albufeiras

Como já foi dito, é necessário saber-se a correspondência entre os valores do volume dos sedimentos depositados e os respectivos valores do peso, isto porque em geral as estimativas do caudal sólido afluyente são feitas em unidades de massa ou de peso e por outro lado é importante saber qual é o valor de volume perdido com o assoreamento. A correspondência desejada é obtida com o conhecimento da massa ou do peso específico dos depósitos.

O peso específico dos depósitos é heterogêneo mas de uma maneira geral os principais factores que vão influenciar o seu valor são:

- Textura e dimensão das partículas
- Formas de exploração da albufeira
- Grau de exposição ao ar dos depósitos
- Permeabilidade dos depósitos
- Peso da camada sobrejacente
- Tempo decorrido

Sendo assim é natural que se procure estimar o peso específico dos depósitos tomando em consideração, pelo menos, um daqueles factores. No quadro 4.4 mostra-se a relação encontrada entre a dimensão dos sedimentos e o peso específico dos depósitos recentemente depositados, segundo vários autores.

LANE e KOELZER 1943, baseados nas observações de várias albufeiras deduziram uma fórmula que toma em consideração três factores; a dimensão dos sedimentos, exploração da albufeira e o tempo decorrido.

A fórmula é

$$\gamma_t = \gamma_I + K \log T \quad (4.40)$$

em que

γ_I - peso específico inicial, isto é, do sedimento recentemente depositado

K - coeficiente tabelado (quadro 4.5) dependente da dimensão do sedimento e do tipo de exploração da albufeira

T - tempo decorrido

γ_T - peso específico ao fim de T anos.

Na tabela 4.6 são dados os valores de K e de γ_I correspondentes às três dimensões de sedimento considerados, areia, silte e argila, e correspondentes

aos 4 tipos de exploração de albufeira:

Tipo I - Sedimento sempre, ou quase sempre, submerso

Tipo II- Albufeira com variação de nível moderado a normal

Tipo III- Albufeira com variação de nível considerável

Tipo IV - Albufeira normalmente vazia

Como exemplo de cálculo, considere-se um depósito constituído por 20% de areia, 40% de silte e 40% de argila, tendo a albufeira um tipo exploração I. Neste caso o peso específico médio dos depósitos ao fim de 100 anos será de:

$$\gamma_{100} = 0,20 \times 1,49 + 0,40(1,04 + 0,091 \log 100) + 0,40(0,48 + 0,25 \log 100) = 1,18 \text{ tf/m}^3$$

MILLER 1953, aperfeiçoou o modelo precedente quer considerando preferíveis os valores indicados também no quadro 4.5 (coluna de Trask), quer deduzindo uma fórmula que permitisse um cálculo mais rápido por meio da utilização de um gráfico, Fig. 4.16.

A fórmula é

$$\gamma_T = \gamma_I + 0,434 K \left[\left(\frac{T}{T-1} \right) \ln T - 1 \right] \quad (4.41)$$

em que as variáveis são idênticas às fórmulas (4.40) e em que se pode obter o valor

$$X = 0,434 \left[\frac{T}{T-1} \ln T - 1 \right] \quad (4.42)$$

por leitura directa da figura 4.16, para determinado valor de T.

No exemplo atrás referido será

$$\gamma_{100} = \gamma_I + 1,588 K = 0,20 \times 1,41 + 0,40(1,08 + 1,588 \times 0,091) + 0,40(0,21 + 1,588 \times 0,25) = 0,282 + 0,489 + 0,243 = 1,01 \text{ tf/m}^3$$

Posteriormente LARA 1963, fez um estudo detalhado de 1316 amostras cor-respondente aos 4 tipos de exploração de albufeiras, no qual averiguou a pos-sibilidade de utilização de três fórmulas para se estimar o peso específico médio dos sedimentos recentemente depositados.

As três equações ensaiadas foram:

$$\gamma_I = W_a p_a + W_s p_s + W_{ar} p_{ar} \quad (4.43)$$

(Como a de Lane e Koelzer)

$$\gamma_I = \left(\frac{p_a}{W_a} + \frac{p_s}{W_s} + \frac{p_{ar}}{W_{ar}} \right)^{-1} \quad (4.44)$$

$$\gamma_I = W_a^i p_a^j + W_s^k p_s^l + W_{ar}^m p_{ar}^n + W_p^i p_a^j p_s^k p_{ar}^l p_{ar}^m \quad (i+j+k=l) \quad (4.45)$$

Chegando a conclusão que era preferível utilizar a de Lane e Koelzer, em-bora utilizando novos valores de constantes W, os quais são apresentados no quadro 4.6.

A estimativa do peso específico para o mesmo exemplo atrás referido da-ria então

$$\gamma_{100} = 0,20 \times 1,55 + 0,40(1,12 + 0,09 \log 100) + 0,40(0,41 + 0,25 \log 100) = 1,19 \text{ tf/m}^3.$$

4.4 - Conclusões

A utilização de modelos no estudo do assoreamento das albufeiras tem si-do feita com diferentes resultados. Os modelos matemáticos fornecem, geralmen-te, valores médios de vários parâmetros nas secções, mas tornam relativamen-te fácil a determinação da variação no tempo daqueles parâmetros, os modelos hidráulicos têm a vantagem de fornecerem variações espaciais de parâmetros mas em contrapartida a avaliação das variações no tempo são mais difíceis. Os modelos matemáticos também possibilitam o estudo de problemas que abrangem maiores áreas pois que os modelos hidráulicos são em geral limitados a exten-sões de rios da ordem das dezenas de quilómetros.

Em princípio, quanto mais complexo for o modelo matemático maior é a capacidade para resolver os problemas, pois com ele é possível controlar maior número de parâmetros, simulando o protótipo com maior rigor, mas no entanto tem a desvantagem de exigir mais tempo para a sua taragem. Mesmo considerando o modelo matemático já verificado e portanto funcionando como rotina, este exige grande número de dados, ainda que por vezes sejam simplificações exageradas do protótipo. São exemplos o modelo sedimentológico da Universidade de Stanford (4.2.3.3) e o modelo de sedimentação de Karashev (4.2.3.3). Portanto é-se muitas vezes levado a utilizar modelos ainda mais simples, não exigindo grande número de dados, fornecendo rapidamente resultados que, é certo, podem ser errados, mas que em grande número dos casos são satisfatórios por serem comprovados pela experiência. Quase todos os restantes modelos apresentados são exemplos deste caso. Prevê-se um aumento de utilização de modelos matemáticos mas que está dependente em grande parte de:

- Maior número de observações do protótipo, tanto dos assoreamentos ocorridos, dos parâmetros hidráulicos e sedimentológicos condicionantes, como da reunião de dados hidrológicos das bacias alimentadoras das albufeiras.

- Melhor conhecimento dos processos erosivos, do transporte sólido e de sedimentação de modo a se utilizarem, nos modelos, funções matemáticas realistas.

- Verificação dos modelos existentes em bacias hidrográficas.

A utilização dos modelos hidráulicos é limitada a fenómenos localizados, e mesmo assim com restrições devidas aos erros derivados da utilização de materiais coerentes. Os modelos aerodinâmicos permitem resolver problemas em regiões mais extensas, estando-se todavia numa fase primária de exploração desse tipo de modelos.

5 - CONTROLE DO ASSOREAMENTO DAS ALBUFEIRAS

5.1 - Introdução

Já desde há dois ou três séculos que o problema do assoreamento tem sido sentido pelos utilizadores das albufeiras criadas pela construção de barragens nos cursos de água, pelo que desde então se tem procurado empregar processos de actuação que, embora não permitindo evitar totalmente a acumulação de sedimentos, pelo menos prolonguem a vida útil e actuem de modo eficaz na rentabilidade da exploração dos aproveitamentos hidráulicos.

Um método, não propriamente dito de controle de assoreamento, mas de adiamento das consequências dos assoreamentos, consiste na reserva de um volume morto onde se acumulam os depósitos durante certo intervalo de tempo. O volume morto corresponde à parte da albufeira que fica abaixo da cota da soleira inferior da tomada da água, isto é, a parte da albufeira que em princípio não interfere com a exploração normal do aproveitamento.

A escolha do volume necessário para o depósito dos sedimentos deverá basear-se nos dados de caudal sólido afluente, acontecendo frequentemente, quando tais dados são desconhecidos, que se escolhe arbitrariamente, ou pouco justificadamente um valor.

Acontece ainda que os sedimentos depositados não se limitam ao volume reservado, mas antes se distribuem por cotas superiores à considerada como limitando o volume morto, havendo então uma perda de volume útil antes de se esgotar a parte previamente reservada para a deposição.

O método é, em geral, justificado economicamente desde que o aproveitamento tenha uma vida útil suficiente para amortizar o investimento.

Na verdade o assoreamento das albufeiras aparece em grande número delas conduzindo à ideia derrotista que pode ser expressa por frases "inelutável fim da albufeira" ou "impotência do engenheiro para resolver economicamente

o problema da redução da capacidade da albufeira". Tais frases exprimem a dificuldade de se resolverem satisfatoriamente os casos ocorridos tanto no passado como na actualidade, mas desde que se compreendam bem as causas e os condicionamentos dos fenómenos em jogo e se, por outro lado, forem utilizados os meios tecnológicos potencialmente mais eficientes, que o progresso da técnica permite, será com certeza possível, se não eliminar totalmente, pelo menos atenuar os efeitos dos assoreamentos.

A eficiência dos métodos utilizados no controle dos assoreamentos das albufeiras depende fundamentalmente do conhecimento do mecanismo da sedimentação nas albufeiras, obtido através de estudos de base, de observações nas albufeiras existentes, de exploração de modelos matemáticos ou físicos, em suma, de todos os possíveis elementos que contribuam para esclarecer o fenómeno.

Podem ser considerados dois modos de actuar no controle do assoreamento: um preventivo, impedindo ou diminuindo o assoreamento, e o outro curativo, eliminando, total ou parcialmente, os depósitos acumulados na albufeira. Na realidade, o controle é mais eficaz se se utilizarem os dois modos de actuação pois os resultados obtidos na prática, mostram que utilizando unicamente um dos modos de actuar, não se poderão geralmente atenuar substancialmente os inconvenientes dos assoreamentos.

É preciso não esquecer que qualquer método de controle só é válido nas albufeiras que ainda não atingiram certa percentagem, variável de caso para caso, de redução da sua capacidade útil inicial, a partir da qual poder-se-á considerar a albufeira como perdida, pela menos economicamente.

Nas secções seguintes são apresentados vários processos de controle do assoreamento, referindo-se as técnicas utilizadas, sua eficiência e economia obtida.

Por fim nas duas últimas secções procura-se chamar a atenção para a ne

cessidade de se atender, na fase de projecto, aos problemas do assoreamento.

5.2 - Métodos utilizados no controle do assoreamento das albufeiras

5.2.1 - Métodos preventivos da erosão na bacia hidrográfica

Uma forma de controlar o assoreamento consiste na diminuição da erosão da bacia hidrográfica que alimenta a albufeira. Como se viu, a erosão depende de muitos factores tais como, o tipo do solo, a cobertura vegetal, o regime de trabalhos agrícolas, os agentes climáticos (intensidade de precipitação, temperatura,...) a extensão e a inclinação das vertentes, etc.

A diminuição dos valores da erosão pode ser conseguida à custa de vários processos, uns essencialmente do domínio da silvicultura, da agricultura ou da pedologia, outros do domínio de engenharia civil. Para se conseguirem os melhores resultados ter-se-á de empregar conjuntamente vários processos.

O "Soil Conservation Service" dos E.U.A. tem uma série de normas e especificações sobre processos de conservação dos solos, dos quais se fazem umas breves referências. Assim podem ser consideradas as seguintes formas de controle da erosão dos solos, BARNES 1971:

- Canais revestidos de vegetação

Estes canais têm a finalidade de escoar a água excedente evitando escoamentos superficiais com elevada energia cinética. A sua forma, dimensões e protecção devem proporcionar um escoamento sem erosões no próprio canal. Este método é aplicável em regiões onde a humidade é suficiente para a manutenção da vegetação que reveste os canais.

- Terraços e preparação do solo para a agricultura

Como se disse acima a inclinação e a extensão das vertentes são dois factores que condicionam a erosão.

Os terraços originados pela construção de muros de suporte de terra ou de outro material, (Fig. 5.1), reduzem a erosão pela diminuição de declive das vertentes originais.

O encurtamento das vertentes consegue-se por outro lado, com a construção de canais segundo as linhas de nível.

- Estruturas hidráulicas

As estruturas hidráulicas são dispositivos projectados para reter, regular, ou controlar o escoamento superficial ou em canais. Podem ser feitas de vários materiais, como terras, madeiras, aço ou betão; como exemplos podem mencionar-se os açudes da correcção torrencial.

- Pequenas albufeiras

Além de servirem para outros fins tais como rega, abastecimento de água, podem ser utilizadas no amortecimento de cheias de pequenas bacias hidrográficas, diminuindo o efeito erosivo destas a jusante da represa e acumulando parte do material erodido a montante.

- Tratamento de ravinas

A estabilização de ravinas pode ser conseguida com cobertura vegetativa e a construção de estruturas hidráulicas.

- Protecção de margens de canais naturais.

Há muitos processos de protecção das margens de canais naturais, tais como cobertura vegetativa, e implantação de grande número de revestimentos, por exemplo, troncos de árvores, paus, arames, rochas, esporões, etc.

Qualquer dos processos indicados têm uma função específica que se presta à utilização em determinada região da bacia hidrográfica da albufeira. O

dimensionamento das estruturas a construir, segundo o organismo americano referido, deve atender aos valores de caudais com frequências que vão de 1 vez em 10 anos a 1 vez em 25 anos, e todas elas devem ser mantidas em estado de funcionamento mediante inspecções e consequentes reparações periódicas.

É evidente que os métodos referidos exigem gastos, por vezes elevados, e que muitas vezes só poderão ser considerados em regiões com certa densidade demográfica em que haja utilização das terras erodíveis, existentes nas bacias hidrográficas alimentadores das albufeiras. Nas bacias hidrográficas em que haja escassa ocupação de terrenos, e onde haja disponibilidade natural, a florestação é a via mais utilizada para reduzir a erosão dos solos, embora em alguns casos, possa haver uma diminuição da afluência líquida à albufeira. Há, no entanto, outras bacias, principalmente nos climas secos, em que nem mesmo a florestação é possível e em que é extremamente difícil ou economicamente impraticável qualquer controle da erosão.

5.2.2 - Métodos preventivos da sedimentação nas albufeiras

São apresentados seguidamente alguns métodos utilizados, com maior ou menor êxito, na prevenção dos assoreamentos das albufeiras, procurando referir-se a técnica empregada, sua eficiência e influência na exploração dos aproveitamentos.

- Albufeiras de decantação

Depois da erosão, os sedimentos são transportados pelo escoamento líquido. No seu percurso, entre o local de formação e a albufeira, aqueles sedimentos podem ser impedidos de continuar o seu deslocamento o que implica a diminuição dos assoreamentos da albufeira, à custa do aumento de deposição na bacia hidrográfica subsidiária, isto é, a deposição, em vez de se dar apenas na albufeira, é repartida por vários locais, aumentando a eficiência da explora

ção do aproveitamento principal.

Isto pode ser feito por intermédio da construção de barragens, relativamente mais pequenas do que a principal, em regiões que sejam consideradas como as principais contribuidoras do caudal afluente à albufeira.

É evidente que só um estudo económico poderá fornecer a indicação do que a construção de barragens de decantação é viável, pois têm de ser consideradas, por um lado, o custo das barragens e, por outro, os benefícios resultantes da menor perda de capacidade útil conseguida com a deposição noutra local.

b) Dispositivos orientadores do escoamento

O método é utilizado, geralmente, para impedir a deposição dos sedimentos em certas zonas da albufeira, na maioria das vezes nas zonas adjacentes aos órgãos de descarga ou de tomada de água.

A sedimentação torna-se difícil porque por meio de dispositivos, que podem ser estruturas mecânicas, muros orientadores do escoamento, etc., a velocidade com que as partículas são transportadas pela água é suficiente para impedir os sedimentos de depositar numa zona determinada. É evidente que este método só tem um efeito localizado, fazendo com que os sedimentos se depositem noutra local ou sejam descarregados para jusante da barragem. Além disso, pode acontecer que também apresente um efeito temporário, mais ou menos longo, porque quando a deposição aumenta os dispositivos utilizados deixam de desempenhar o mesmo papel no escoamento que entretanto foi alterado pelo assoreamento. Evidentemente que pode haver perda de água ao realizar a operação.

- Evacuação de correntes de densidade

Como se viu, os materiais finos são transportados em grande parte pelas

correntes de densidade, e estas formam-se principalmente por ocasião das cheias, donde se pode concluir que grande percentagem dos depósitos têm lugar neste período de cheias. Aproveitando este facto, procura-se fazer diminuir a deposição mediante a descarga da água excedente, que quase sempre ocorre nas cheias, juntamente com o material sólido. O que acontece geralmente, para maior facilidade, é efectuar a descarga pela parte superior do assoreamento, que contém menor concentração de material sólido, quando seria muito mais eficiente, do ponto de vista do assoreamento, a descarga pelo fundo, pois esta permitiria a evacuação do material sólido desnecessário juntamente com a água excedente.

As dificuldades de ordem prática são no entanto muito maiores para a construção das descargas de fundo do que para as descargas da superfície. Assim os depósitos são mais elevados do que aqueles que ocorreriam se fossem descarregados os caudais excedentes pelas comportas de fundo, e por conseguinte é menor a vida útil da albufeira.

A evacuação eficiente das correntes de densidade depende dos vários factores que as influenciam. É evidente que só as correntes de densidade que atingem a barragem poderão ser evacuadas. pelo que as que se extinguem a meio da albufeira irão aumentar os depósitos concluindo-se pois da ineficácia do método para impedir completamente a deposição. As correntes que atingem a barragem podem em princípio ser evacuadas, mais ou menos eficientemente por intermédio de comportas de fundo. Segundo DUQUENNOIS 1955, é preferível ter uma, ou mais, comportas grandes para as grandes descargas de fundo e uma série de pequenas comportas funcionando em abertura total colocadas nos lugares mais convenientes. As comportas maiores têm como função o esvaziamento rápido da albufeira quando necessário, e as pequenas comportas são abertas, no número e durante o tempo necessário para a evacuação óptima da corrente de densidade afluente à barragem. A evacuação óptima é função da abertura

das várias comportas, que pode estar relacionado com a densidade da água a montante destas, de modo a que a água utilizada na descarga de certa quantidade de material sólido seja a mínima possível.

Este método só actua nas partículas de dimensões finas pelo que não impede a formação dos depósitos de granulometria grosseira geralmente situados na parte de montante da albufeira.

5.2.3 - Métodos curativos do assoreamento das albufeiras

- Método espanhol

Este método, citado por DUQUENNOIS 1955, com séculos de experiência, consiste, no esvaziamento completo da albufeira. Os caudais afluentes, posteriores ao esvaziamento provocam a erosão dos depósitos existentes devido a ser maior a velocidade do escoamento com a albufeira vazia do que quando contém água armazenada. É condição essencial a existência de descarregadores de fundo que possibilitem o esvaziamento da albufeira e a descarga dos caudais líquidos afluentes que vão erodir os depósitos, bem como a remossão desses depósitos.

A erosão será tanto maior quanto maior for o caudal afluente e quanto mais inclinada e estreita for a albufeira. Geralmente não é possível eliminar a totalidade dos depósitos quer porque entretanto se deu uma consolidação destes quer porque a energia do escoamento não é suficiente mesmo que não haja consolidação.

O método só é praticável quando a albufeira regularisa caudais anuais ou de menor duração e, além disso, seja possível utilizar a água no desassoreamento.

- Método de desassoreamento por ondas de descarga

DUQUENNOIS 1955, seguindo o mesmo princípio do método espanhol, conside

ra uma variante deste método. A diferença consiste na possibilidade de regulação dos caudais de desassoreamento feita por intermédio de uma pequena barragem construída a montante da principal.

O desassoreamento é feito em duas fases. Na primeira fase, um determinado volume de água retido numa pequena albufeira de montante é descarregado através de comportas grandes de abertura rápida, criando uma onda que ao percorrer a albufeira principal arrasta os materiais depositados, chamando-se então a este arrastamento dos sedimentos depositados o "transporte de aproximação", porque os sedimentos ficam mais próximos da barragem principal. Na segunda fase, na ocasião das cheias ou por intermédio de nova onda de descarga, o material é arrastado até às comportas de fundo que são abertas para dar passagem ao "transporte de desassoreamento".

Como no método anterior a eficiência será tanto maior quanto maior for a inclinação longitudinal de fundo e menor a largura da albufeira. Consegue-se com este método maior eficiência do que no método espanhol porque o caudal de desassoreamento é menor visto que podem ser provocadas ondas de descargas com água não excedente.

É uma solução parcial, porque não impede completamente a deposição, mas pode ser suficiente para a manter estacionária.

- Dragagens

Quando o assoreamento atinge um valor apreciável de percentagem da capacidade da albufeira nenhum dos métodos é capaz de restituir à albufeira a sua capacidade útil inicial. Neste caso, só uma dragagem pode restabelecer essa capacidade. A dragagem é uma técnica muito utilizada nos assoreamentos de estuários e portos e não é de pôr de parte a ideia que pode ser utilizada também nas albufeiras assoreadas. No entanto há aspectos económicos que tornam na maioria dos casos difícil a aplicação de dragagens ao caso em estudo.

A técnica tem possibilitado uma dragagem cada vez mais eficiente e barata, se se utilizarem equipamentos potentes.

As albufeiras são na maioria dos casos de difícil acesso para esse equipamento que só se justificará se o volume a dragar for considerável. Por outro lado um equipamento menos potente torna a dragagem mais cara por unidade dragada. Além do mais é necessário haver uma zona de depósito das dragagens o que por vezes se torna difícil na região da albufeira aumentando o custo do transporte dos dragados.

Actualmente só se justifica a dragagem em pequenas albufeiras ou em partes restritas das albufeiras maiores visto que os preços tornam-na proibitiva para os outros casos. Na entanto no futuro poderá ser um processo relativamente mais económico justificando-se o seu emprego.

5.3 - Inclusão de estudos sedimentológicos no projecto de aproveitamentos hidráulicos

A maioria dos métodos referidos em 5.2 procura controlar o assoreamento mediante certas operações que têm maior ou menor influência na exploração dos aproveitamentos. Uns interferem significativamente no rendimento enquanto que outros quase não alteram o funcionamento normal da exploração. Uns são de aplicação simples enquanto que outros exigem uma programação cuidada.

É do conhecimento geral que em grande número das albufeiras existentes se tem considerado, como meio de evitar os prejuizos dos assoreamentos, apenas a reserva de um volume morto no qual se vai depositar o material sólido afluente à albufeira. O desconhecimento das quantidades de caudal sólido não permite contudo prever seguramente o tempo necessário para que o material sólido depositado preencha o referido volume. Noutras albufeiras utilizam-se, deficientemente, as descargas de fundo para impedir o assoreamento. Nota-se assim que, quer por desconhecimento de métodos melhores para resolver o problema, quer porque o problema do assoreamento é considerado pouco importante, a so

lução adaptada para impedir a perda de volume útil das albufeiras tem sido muto simples mas também ineficiente na maioria dos casos. É pois necessário que no projecto de novas albufeiras, especialmente em regiões semi-áridas, se atenda a eventual importância que os assoreamentos poderão apresentar.

No COLÓQUIO INTERNACIONAL DE LIÈGE 1959, sobre "Barrages et bassins de retenue" chegou-se à conclusão de que o projecto de uma barragem assenta numa investigação coordenada, no intercâmbio de informações e segue um método de aproximações sucessivas para a obra definitiva. Nesse colóquio viu-se que o projecto tem três exigências principais:

- Reconhecimento exaustivo dos locais
- Previsões, tanto quanto possível precisas (e num prazo de tempo curto)
- Adaptação permanente da realização em curso às condições encontradas na execução.

No que diz respeito ao problema dos assoreamentos interressam principalmente as duas primeiras exigências que poderão dar indicações sobre a melhor forma de controlar o assoreamento previsto. Quanto à primeira exigência, uma pergunta surge: será oportuna a construção da barragem atendendo a que não só haverá benefícios resultantes do aproveitamento hidráulico mas também poderá haver uma inutilização definitiva do mesmo aproveitamento em curto espaço de tempo?

Se à primeira vista poderia supor-se que a energia hidráulica num aproveitamento hidroelétrico, num aproveitamento de irrigação, de abastecimento urbano e industrial, seria inesgotável, isto é, uma vez construída a barragem poder-se-iam colher os benefícios, só havendo a considerar os custos de manutenção ou de substituição do equipamento, na verdade, com os assoreamentos, de importância variável de aproveitamento para aproveitamento, os recursos hídricos tornam-se esgotáveis como acontece com as outras fontes de energia, o

carvão, o petróleo, etc... Assim BROWN 1958, acerca deste assunto faz cinco perguntas sobre o tema "considerações de orientação política que afetam a vida das albufeiras:

"1) Em vista do futuro potencial energético atómico e nuclear, qual a capacidade das albufeiras a serem utilizadas como aproveitamento hidroeléctrico?

2) Nas bacias hidrográficas onde se pode obter um aumento de produção agrícola, de um modo mais barato e rápido, armazenando a água onde ela se precipita, deve-se desenvolver esta forma de utilização ou antes recorrer ao planeamento de grandes albufeiras que armazenam o caudal excedente, para a irrigação das terras mais a jusante, por um preço relativamente mais elevado e com as conseqüentes perdas por evaporação e nos caudais de irrigação?

3) Em regiões onde o clima, os recursos minerais ou as facilidades de comunicação indicam um inevitável aumento das necessidades de água para uso doméstico e industrial, dever-se-á construir albufeiras para outros fins, como por exemplo irrigação e produção da energia, iniciando assim o seu ciclo de morte?

4) Onde o clima e o solo permitem o crescimento de culturas vegetais especiais necessárias para uma dieta equilibrada, deverão os armazenamentos para a irrigação ser substituídos por armazenamentos para fins industriais que podem ser desenvolvidos noutra local?

5) Deverá haver um inventário mundial dos locais importantes que ainda restam para a construção de barragens, e depois de considerações apropriadas, planos nacionais para o desenvolvimento programado por empresas privadas e governamentais de acordo com o princípio de conservação desses locais para servirem mais e melhor a longo prazo?"

A resposta a estas perguntas conduz a uma opção da política global a seguir. Em cada projecto particular, no caso de se optar pela construção da barragem, deve, então proceder-se ao reconhecimento das características da bacia hidrográfica subsidiária e não apenas ao reconhecimento do local onde será implantada a barragem. Necessariamente um dos elementos mais importantes a recolher diz respeito às principais fontes de sedimentos. Como o problema de assoreamento põe-se com diferentes graus de gravidade em regiões distintas será naquelas onde se esperam maiores valores de erosão dos solos que deverão incidir estudos mais cuidadosos. Geralmente são as regiões áridas, onde também as disponibilidades de água são mais limitadas, que apresentam piores condições naturais.

A obtenção de previsões de transporte sólido num prazo de tempo curto seguir-se-á à colheita de maior número possível de dados obtidos por meio de observações especialmente programadas para o efeito, que servirão para complementar os elementos obtidos por registos de rotina quando os houver. Assim interessarão especialmente dados hidrológicos (aliás também muito importantes para outros aspectos do projecto da barragem), dados geológicos, pedológicos, sedimentológicos, vegetativos, hidráulicos, etc... A utilização de modelos, quer físicos, quer matemáticos, permite então a previsão dos caudais líquido e sólido afluentes, e suas características como distribuição no tempo e no espaço, e granulometria das partículas transportadas.

Daqui em diante deverá haver uma estreita colaboração entre os vários especialistas do projecto. Em face dos valores previstos de afluência do caudal sólido, do valor escolhido para capacidade da albufeira criada pela barragem e das características da barragem, poder-se-á, só então, estimar com maior grau de precisão o assoreamento e distribuição dos depósitos. É esta uma fase muito importante do projecto, na qual se poderá escolher a forma mais económica e eficiente de minizar o assoreamento. Por isso mesmo é tam-

bém a parte mais difícil e complexa, pois ter-se-ão de conjugar três aspectos, que por vezes são antagónicos; por um lado atender aos estudos hidrológicos que dão os elementos necessários para a escolha da capacidade da albufeira de modo a fornecer em cada período temporal a água necessária para o fim em vista, (energia, irrigação, abastecimento), por outro lado atender aos estudos sedimentológicos sobre a melhor forma de exploração para que o assoreamento seja atenuado e por último atender aos estudos estruturais que deverão definir a estrutura mais económica sem descuidar todos os órgãos necessários para uma exploração que assente nos dois primeiros aspectos, hidrológico e sedimentológico. Vê-se assim que é necessário um estreito diálogo entre estas três sectores de projecto e que, por sua vez, cada sector, se baseia em modelos próprios específicos para cada um, obrigando uma compatibilização desses modelos. No que respeita aos modelos a utilizar pelo encarregado dos problemas sedimentológicos, deverá ser necessário a informação dada pelo engenheiro que estuda os problemas postos pelas curvas guias de exploração e também a informação da viabilidade estrutural de certas soluções que os ensaios em modelo indiquem como boas para controlar o assoreamento.

Como já foi dito, o projecto vai-se definindo por aproximações sucessivas, nas quais serão melhorados certos aspectos à medida que os vários modelos se forem completando mutuamente.

Na verdade a consideração da metodologia indicada é ideal, e a realidade estará tanto mais perto do ideal quanto mais importante for o empreendimento em estudo. Na maioria dos projectos os problemas sedimentológicos são artificialmente simplificados e por isso mesmo é inexistente qualquer forma eficiente de controle dos assoreamentos.

Cada um dos métodos descritos utilizados no controle dos assoreamentos tem sido considerado ineficiente para, só por si, limitá-los substancialmente. A utilização de vários métodos conjuntamente poderá no entanto aumentar

significamente a sua eficácia. Mas ainda se está longe de se poder dizer que problema está satisfatoriamente resolvido. Há necessidade de se investigarem outros métodos mais eficientes, investigações essas que geralmente devem ser conduzidas em estudos de casos concretos de albufeiras, além evidentemente de estudos complementares de investigação básica, já que cada albufeira tem características específicas não permitindo muitas vezes extrapolações de processos para aplicação noutro caso.

Por último interessa focar o problema económico de estudo de métodos de controle dos assoreamentos e conseqüente receio de este ser mal sucedido. Assim, mesmo com a ajuda de modelos que indiquem um bom comportamento do método adoptado, e com argumentos racionais, poderá haver resistência à sua adopção. Ainda mesmo que o método prove quanto à sua eficácia é sempre necessário prová-lo quanto à economia resultante. E este aspecto é muito importante pois o conceito de economia pode ser considerado segundo vários graus. A melhoria do sistema de controle de assoreamentos que é paga pela geração que constrói a barragem vai originar uma economia para as gerações futuras; enquanto a não consideração de qualquer sistema melhorado pode diminuir substancialmente o investimento inicial embora à custa de uma inutilização cujas conseqüências serão sentidas num futuro mais ou menos próximo.

Segundo BROWN 1958, quando as reservas naturais são abundantes (embora cada vez seja mais difícil afirmá-lo) poder-se-á atender principalmente ao aspecto financeiro, isto é, à amortização do investimento inicial. Quando os recursos hídricos podem ser rapidamente inutilizados e esgotados dever-se-á atender a uma economia de maior alcance podendo a solução a adoptar não ser financeiramente óptima.

No fim de contas, o conceito que interessa discutir, para se ajuizar da necessidade de controlar assoreamentos, é o de vida útil da albufeira. É um facto que algumas albufeiras apresentam um assoreamento mínimo sendo portan-

to um problema desconhecido no seu projecto, nas outras esse assoreamento efectua-se com grande rapidez o que levará a empregar todos os esforços para minimizá-lo.

Embora o controle do assoreamento das albufeiras não tenha sido resolvido satisfatoriamente até ao presente é de esperar que quando os locais para novas albufeiras começarem a ser encontrados com maior dificuldade nessa altura deverão aparecer meios eficazes porque a necessidade em geral cria soluções engenhosas.

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS. APLICAÇÃO AO CASO PORTUGUÊS

Nesta secção tecem-se considerações finais atendendo ao caso concreto das albufeiras portuguesas.

Como tem sido encarado em Portugal o problema do assoreamento das albufeiras?

Desde 1920 foi construída em Portugal Continental cerca de meia centena de barragens, cujas albufeiras têm capacidades entre um e mil milhões de metros cúbicos. Um dos pontos mais importantes no projecto das barragens, que condiciona a rentabilidade da obra, é, como se viu, a fixação do volume morto, isto é, do volume que se prevê venha a ser preenchido com sedimentos depositados. Ora nas barragens construídas em Portugal os valores arbitrados para o volume morto foram, por deficiência de dados, fixados de uma forma um tanto arbitrária, correndo-se o risco de cometer erros grosseiros, tanto por excesso como por defeito. Deste modo, para suprir a deficiência apontada, há o maior interesse em que se empreendam campanhas sistemáticas de observações dos assoreamentos nas albufeiras portuguesas. No que respeita aos assoreamentos destas albufeiras parece suceder, por razões fundamentalmente geológicas, que, de um modo geral, eles são menos intensos a norte do rio Tejo do que a sul do mesmo, em particular em zonas como a abrangida pelo Plano de Rega do

Alentejo onde as erosões parecem ser mais significativas.

Até à data foram realizadas observações esporádicas (ver anexo A) num pequeno número de albufeiras. Estas observações por um lado são insuficientes para formular conclusões seguras, mas por outro parecem evidenciar que os assoreamentos ocorridos têm importância suficiente para impor um estudo sistemático do problema.

Como programa de estudo sistemático dos assoreamentos das albufeiras portuguesas propõe-se a realização dos seguintes trabalhos:

- Inventário das albufeiras portuguesas
- Definição dos métodos a utilizar na observação dos assoreamentos ocorridos
- Programação das observações a realizar
- Realização de estudos de investigação básica
- Definição de métodos de previsão e de cálculo dos assoreamentos
- Estudo de dispositivos de controle de assoreamentos
- Normalização no projecto e na exploração de aproveitamentos.

O inventário das albufeiras portuguesas terá a finalidade de centralizar e se possível normalizar, as informações de todos os parâmetros importantes para o posterior estudo. Para isso efectou-se já um inquérito a todos os organismos, públicos ou privados, que de algum modo estão ligados à exploração dos aproveitamentos. Interessou fundamentalmente conhecerem-se elementos relativos à bacia hidrográfica subsidiária da albufeira, características da albufeira e da barragem, registos hidrológicos e de exploração de aproveitamento.

Com a definição dos métodos a utilizar na observação dos assoreamentos pretende-se explicitar mais concretamente qual o material necessário para a realização dos levantamentos dos vários tipos de albufeiras assim como a metodologia da análise dos valores obtidos. Ao mesmo tempo poder-se-á programar as

observações a realizar, baseando-se essa programação, por um lado na informação dada pelo inventário e por outro lado na metodologia atrás definida. Estas observações podem ser constituídas por levantamentos parciais das mesmas ou por qualquer outro tipo de observação que forneça dados significativos para os estudos que houver necessidade de realizar.

A realização de estudos de investigação básica é importante para aprofundar o conhecimento dos mecanismos dos fenómenos em jogo nos assoreamentos de albufeiras. O problema é interdisciplinar, sendo necessário ter presentes aspectos relativos à constituição e propriedades dos solos, à hidrologia, à mecânica dos fluídos, às leis do transporte sólido em cursos de água e à sedimentologia. Portanto a acompanhar as observações nos protótipos deverá fazer-se um estudo teórico-experimental cuja finalidade é complementar os resultados colhidos na natureza, prevendo-se a realização de um estudo aprofundado na mecânica dos assoreamentos de albufeiras, tendo particularmente em conta o papel que os escoamentos estratificados desempenham na sua evolução. Para a realização deste estudo utilizar-se-ão modelos físicos e matemáticos, com a finalidade de procurar não só esclarecer o mecanismo dos fenómenos envolvidos no processo de assoreamento como também reproduzir assoreamentos que tenham ocorrido em protótipo.

Tomando como base os dados colhidos nas observações de campo e nos resultados dos estudos teórico-experimentais feitos em laboratório ou em protótipo, é possível definir métodos de previsão das taxas de assoreamento, projectar dispositivos especiais para o controle dos assoreamentos e definir a melhor forma de operação dos órgãos de manobra normalmente previstos nos aproveitamentos, em particular das descargas de fundo.

Por último e como consequência dos estudos efectuados poder-se-ão definir normas que regulem quer a exploração (apresenta-se uma norma, já existente, no anexo B) quer o projecto de aproveitamentos, tendo em especial atenção

o controle dos assoreamentos.

O programa indicado ir-se-á efectuando segundo a ordem cronológica indicada embora possa haver simultaneidade de trabalhos. Como primeira necessidade, e dentro de um prazo de tempo curto, procurar-se-á inventariar as albufeiras, definir a metodologia a utilizar e programar as observações a efectuar a médio prazo.

Todo o restante trabalho exigirá um prazo maior, dependente aliás do pessoal e instalações disponíveis, não se estando portanto, presentemente em condições de prever qual o tempo necessário para o realizar. É no entanto essencial que se sinta a importância do problema dos assoreamentos pois estão arreigadas certas opiniões segundo as quais este problema preocupará os netos da actual geração sendo portanto cedo para se fazer qualquer coisa que não se ja arbitrar valores de volumes mortos.

Lisboa, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Junho de 1976

João Rocha

João Manuel S.F. Rocha
Estagiário para especialista

CHEFE DA DIVISÃO

Luis Veiga da Cunha

Luis Veiga da Cunha
Especialista

CHEFE DO SERVIÇO

Fernando Abecasis

Fernando Abecasis
Investigador

VISTO

J. Ferry Borges
O ENGENHEIRO DIRECTOR

J. Ferry Borges

JR/RT

Alfredo P. Carneiro

BIBLIOGRAFIA

- ACKERMAN, WILLIAM C. (1970) - Needed Research in sedimentation. Transactions, American Geophysical Union, Vol. 38, N^o. 6, December, p. 925-927.
- AMERICAN GEOLOGICAL INSTITUTE (1962) - Dictionary of geological terms. Dolphin Books, Doubleday e Co., Garden City, New York (LNEC 58887-A).
- BARNES, R.C (1971) - Erosion control structures. River Mechanics, Hsieh Wen Shen, Fort Collins, Colorado, Chapter 28, p. 28-1 a 28-26 (LNEC 64108).
- BONDURANT, D. C. (1959) - Reservoir sedimentation. Barrages et bassins de retenue, Colloque International, Université de Liège, Mai, Volume 14, p. 185-195 (LNEC 31045).
- BORLAND, WHITNEY (1971) - Reservoir sedimentation. River Mechanics. Hsieh Wen Shen, Fort Collins, Colorado, Chapter 29, p. 29-1 a 29-38 (LNEC 64108).
- BROWN, CARL B. (1958) - Factors affecting the useful life of reservoirs. Proceedings of ASCE, IRL, January, p. 1503-1 a 1503-8.
- BRUNE, GUNNAR (1948) - Rates of sediment production in midwestern United States. Soil Conservation Service, TP-65.
- BRUNE, GUNNAR (1953) - Trap efficiency of reservoirs. Transactions, American Geophysical Union, Vol. 34, No 3, June, p. 407-418.
- BUREAU OF RECLAMATION (1959) - Description and use of reservoir density sampler. Sedimentation Section, Hydrology Branch, Denver, Colorado, May (LNEC 66498).
- BUREAU OF RECLAMATION (1963) - Earth Manual, Denver, Colorado.
- BURELL, G.N. (1951) - Constant-factor method aids computation of reservoir sedimentation. Civil Engineering, ASCE, July, p. 51-52.
- CHAMOV, G.I. (1959) - L'envasement des réservoirs d'eau. Edition de L'hydraulique et de la meteorologie, L.H.

- CHURCHILL, M.A. (1948) - Discussion of Analysis and use of reservoirs sedimentation data (L.C.Gottschalk), Federal Inter-Agency Sedimentation Conf. Colorado, 1974. p.139-140.
- CORBEL, J. (1959) - Vitesse de l'érosion. Zeits. für Geomorphologie, V.3, p. 1-28.
- CRAWFORD, N.H.e LINSLEY, R.K (1966) - Digital simulation in hydrology: Stanford Watersched Model IV. Technical Report No 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, July.
- DUQUENNOIS, H.(1955) - Lutte contre la sedimentation des barrages reservoirs Electricité et Gaz d'Algérie, Compte Rendu N° 2, Août (LNEC 20201)
- DUQUENNOIS, H. (1956) - New methods of sediment control in reservoirs. Water Power, May, 1956, p. 174-180
- EAKIN, H.M. (1939) - Silting of reservoirs. Technical Bulletin 524, U.S. Departement of Agriculture
- EINSTEIN, HANS A. (1950) - The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Technical Bulletin No. 1026, September. United States of Agriculture, Washington.
- EINSTEIN, H.A. (1965) - Final report spawning grounds. University of California, Hydraulic Engineering Lab.
- ENGINEERING NEWS-RECORD (1966) - Plotter speeds sounding surveys. August 11, p. 106.
- GOLE et al. (1971) - Prediction of siltation in harbour, bassins and channel 14°. Congresso do AIRH, Vol. 4 (LNEC 62900).
- GOTTSCHALK, L.C. (1951) - Measurement of sedimentation in small reservoirs. Proceedings of ASCE, Vol. 77, Separata No 55, January.
- HEINEMAN, H.G. e DVORAK, V. I. (1963) - Improved volumetric survey and computation procedures for small reservoirs, Proceedings Federal Inter-Agency, 1963 Miscelaneous Publication 970, pag. 845-856(LNEC 62019).

- HEINEMANN, Herman G. (1962) - Volume-weight of reservoir sediment. Proceeding of ASCE HY5, September pg. 181-197.
- HUBBELL, D.W. e SAYRE (1964) - Sand transport studies with radioactive tracers-Proceedings of ASCE, HY3, p. 39-68.
- HUNG, C.S. (1971) - Research in stochastic models for bed-load transport. River Mechanics, Hsieh Wen Shen, Fort Collins, Colorado, Appendix B, p. B1-B47 (LNEC 64 108).
- KARAUSHEV, A.V. (1964) Turbidity and the propagation of turbid zones in reservoirs, Soviet Hydrology: Selected Papers, No. 3, p 240-253.
- KARAUSHEV, A.V. (1965) - A method of calculating sedimentation in reservoirs, Soviet Hydrology: Selected Papers, No 3. p. 204-215.
- KOELZER, VICTOR A. e LARA, JOE M. (1958) - Densities and compaction rates of deposited sediment, Proceedings of ASCE, HY2, April, p.1603-1 a 1603-15.
- KOMORA, J. e SUMBAL, J. (1965) - Étude sur des modeles aérodynamiques de la sedimentation, du débits solides en suspension dans les retenues. La Houille Blanche, N° 2, p. 149-157
- LANE, E.W. e KOELZER, V.A. (1943) - Density of sedimentations deposited in reservoirs. Report n.9. A study of methods used in measurements and analysis of sediment loads in streams, Hydraulic Lab., Univ. of Iowa, Iowa City, Iowa, November.
- LANGBEIN, W.B. e SCHUM, S.A. (1958) - Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. Transactions, American geophysical Union, Vol. 39, n° 6, December, p. 1076-1084.
- LARA, J.M. e PEMBERTON, E.L. (1963) - Initial unit weight of deposited sediments Proceedings Federal Inter-Agency, Miscelenous Pulbication n° 970, p. 818-845, LNEC (62019).
- LEOPOLD, LUNA B. e al. (1964) - Fluvial process in geomorphology. W. H.

- Freeman and Co., San Francisco and London (LNEC 44544).
- LNEC (1966) - Especificação E 196 - Solos - Análise granulométrica Junho.
- LNEC (1967) - Especificação E 204 - Solos - Determinação da baridade seca "in situ" método da garrafa de areia.
- LNEC (1973) - Modelos analógicos aerodinâmicos para o estudo de problemas fluviais. - Outubro, 1º relatório. Síntese dos conhecimentos actuais (2 vol.), Julho.
- MAHMOOD, KHALID e SHEN, H.W. (1971) - The regime concept of sediment-transporting canals and rivers. River Mechanics, Hsieh Wen Shen, Fort Collins, Colorado, Chapter 30, (LNEC 64108).
- MENARD, H.W. (1961) - Some rates of regional erosion. The Journal of Geology, vol. 69, March, nº 2. Chicago p. 154-161.
- MEYER, L.D. e WISCHMEIER, W.H. (1969) - Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. Transaction of ASAE, vol. 12 p. 754-758 762.
- MILLER, C.R. (1953) - Determination of the unit weight of sediment for use in sediment volume computations. Hydrology Branch, U.S. Bureau of Reclamation Denver, Colorado, February (LNEC 18878).
- NEGEV MOSHE (1967) - A sediment model on a digital computer. Departement of Civil Engineering, Stanford University, Technical Repor No 76, March (LNEC 66265).
- PARTHENIADES, E.1971 - Erosin and deposition of cohesive materials. River Mechanics. Hsieh Wen Shen, Fort Collins, Colorado. Chp. 25. p. 25-1 a 25-91 (LNEC 64108).
- PRYCH, E.A. e HUBRELL, D.W. (1966) - A sampler for coring sediments in rivers and estuaries. Geological Society of American Bulletin, N. York, May 1966, vol.77, Nº.5, pg. 549-555
- RAZUMIKHINA, K.V. (1966) - Question of the applicability of methods of compu-

from cropland, U.S.D.A. Agron. Handbook No 282, 48 p.

WOOLHISER, D.A. e TODOROVIC, P. (1971) - A stochastic model of sediment yield for ephemeral streames. Paper presented at the Int. for Statistics in Physical Science, Symposium of Hydrology, Tucson, Arizona.

- ting sediment transport to streamflow. Soviet Hydrology: Selected Papers, No 1, p.1-25.
- SHEPHERDSON, ISAAC, (1963) - Using Raydist for sedimentation surveys on larger reservoirs. Proceedings Federal Inter-Agency, Miscellaneous Publication 970, p. 869-874 (LNEC 62019).
- SHVARTSMAN, A. Ya. (1964) - Investigation of turbidity of the Kremenchug Reservoir. Soviet Hydrology, Selected Papers, nº. 3, p. 254-275.
- STRAHLER, A.H. (1952) - Dynamic basis of geomorphology. Geolog. Soc. Amer. Bull. Vol. 63, p. 923-938.
- STERNBERG (1875) - Zeitschrift für Bauwesen.
- SUMER (1970) - Model similarity concerning the transport of suspended matter in a turbulent flow field. Journal of Hydraulic Research, Delft 8 (3) p.358-364.
- TASK COMMITTEE (1963) - Sediment transportation mechanics: density currents. Proceedings do ASCE, HY5, September p. 77-87.
- TASK COMMITTEE (1971) - Sediment transportation mechanics: H. Sediment discharge formulas Proceedings ASCE, HY4, p. 523-561
- TASK COMMITTEE (1970) - Sediment measurement techniques: reservoir deposits. Proceedings da ASCE, HY12, p. 2446.
- VEIGA DA CUNHA, L. (1969) - Evolução e posição actual dos conceitos sobre transporte sólido em escoamentos com superfície livre, Memória nº. 346, LNEC.
- WILMS, D.A. e SNEL, M.J. (1971) - Etude de la sédimentation - La Technique de l'eau et de l'assainissement, nº. 290 e 293, Fevereiro e Maio, p.37-45 e 33-42.
- WISCHEMEIER, W.H. e SMITH, D.D. (1962) - Soil-loss estimation as a tool in soil and water management planning - Int. Association Science Hydrolo. Publi. 59, p. 148-159.
- WISHMEIER, W.H. e SMITH, D.D. (1965) - Predicting rainfall erosion losses