Considerações sobre Análise e Modelagem de Barragens de Enrocamento com Face de Concreto

H.L.L. Hovere, UFSC, D. Pacheco, Leme Engenharia Ltda, P. R. Senem, Leme Engenharia Ltda., D.D. Loriggio, UFSC, A. Watzko, Leme Engenharia Ltda e J. S. B. Stramandinoli, UFSC

RESUMO

As barragens de enrocamento com face de concreto têm sido muito utilizadas no Brasil e no mundo. Os critérios de projeto usados ainda são empíricos, baseados na experiência do comportamento geotécnico. A utilização da análise numérica ainda tem uma importância relativamente pequena no projeto como um todo.

Este trabalho apresenta uma revisão dos modelos numéricos usados atualmente no projeto dessas barragens, bem como modelos mais sofisticados que têm ficados restritos à área de pesquisa. São apresentados modelos elásticolineares, modelos elásticos não lineares, modelos com fases de construção, modelos para a simulação do primeiro enchimento e modelos elasto-plásticos.

Os resultados das análises são muito sensíveis aos parâmetros dos materiais utilizados nos modelos, portanto apresenta-se também neste trabalho uma análise sobre a avaliação dos diversos parâmetros dos materiais. A fase construtiva da barragem, devidamente instrumentada, tem sido valiosa na determinação dos parâmetros dos materiais.

Este trabalho pretende também apresentar uma análise crítica dos modelos atuais, bem como propor melhorias para a área de projeto. Espera-se contribuir para uma maior participação das análises numéricas em projeto, que pode resultar em uma otimização em várias áreas, tal como no zoneamento do corpo da barragem.

PALAVRAS-CHAVE

Análise Numérica, Barragem, Enrocamento, Laje de concreto.

I. INTRODUÇÃO

Em face da praticidade, flexibilidade e competitividade econômica, as barragens de enrocamento com face de concreto têm sido muito utilizadas no Brasil e no mundo. Apesar do enrocamento já ter sido utilizado em barragens desde 1880, estudos com embasamento científico são recentes e ainda incapazes de definir critérios de zoneamento e dimensionamento destas obras. As barragens de enroncamento com face de concreto são ainda hoje projetadas empiricamente. A utilização da análise numérica ainda não é uma ferramenta usual para o desenvolvimento e dimensionamento deste tipo e barragem.

Os modelos atualmente usados pelas empresas projetistas para este tipo de estruturas fazem, basicamente, uma análise elástico-linear e alguns modelos levam em conta as fases construtivas. Estes modelos são usualmente utilizados no acompanhamento das deformações, sendo o ajuste dos parâmetros baseado na instrumentação. Raramente os modelos numéricos têm a função de desenvolvimento do projeto.

Um cuidado especial deve ser dado à determinação de parâmetros dos materiais usados nos modelos, devido à extrema sensibilidade das análises a esses parâmetros. Esta é a questão mais delicada do processo de aceitação da análise numérica para este tipo de estrutura. A instrumentação das barragens tem sido valiosa na determinação dos parâmetros dos materiais e na calibração dos modelos durante as análises de acompanhamento. Há a necessidade do desenvolvimento de ensaios capazes de determinar de maneira representativa os parâmetros dos materiais de enrocamento para que se possa valer da análise numérica para projeto.

Já existem vários modelos propostos que utilizam análises não lineares, mas que ficam restritos ao meio acadêmico e de pesquisa. A necessidade de um maior número de parâmetros para essas análises, associada ainda às dificuldades de sua obtenção, tem sido um dos motivos para a não utilização prática desses modelos.

A laje de concreto de montante tem sido objeto de estudo, uma vez que os critérios de dimensionamento dessas peças devem ser atualizados. Nesse caso a análise conjunta da laje com o enrocamento é importante para a obtenção dos esforços solicitantes na laje.

Estudos na área da modelagem da barragem são importantes para contribuir com uma maior participação das análises numéricas em projeto, que pode resultar em otimização em várias áreas, tal como no zoneamento do corpo da barragem.

II. COMPORTAMENTO DAS BARRAGENS

No período construtivo as deformações no centro da barragem são principalmente verticais devido ao estado de compressão confinada. Próximo dos taludes de montante e de jusante as deformações iniciais são principalmente verticais, porém, com o peso próprio do aterro, o incremento do movimento lateral torna-se significante.

Durante o período construtivo ocorrem deformações de assentamento e recalques significativos. Os deslocamentos horizontais se caracterizam por apresentarem uma deformação dos espaldares para o centro da estrutura na metade superior da barragem, provocando um estreitamento,

Os autores agradecem à Tractebel Energia pelo apoio e o financiamento da pesquisa "Análise do Comportamento das Lajes de Concreto Armado nas Barragens de Enrocamento com Face de Concreto" cujos resultados são apresentados parcialmente neste artigo.

H.L.L. Rovere , Ph.D., professora adjunto do Departamento de Engenharia Civil da UFSC (e-mail: henriette@ecv.ufsc.br).

D. Pacheco, engenheira da Leme Engenharia Ltda (e-mail: debora@leme.com.br).

P. R. Senem, mestre, engenheiro civil da Leme Engenharia Ltda (e-mail: senem@leme.com.br).

D.D. Loriggio, doutor, professor titular do Departamento de Engenharia Civil da UFSC (e-mail: loriggio@ecv.ufsc.br).

A.Watzko, engenheiro da Leme Engenharia Ltda (e-mail: aires@leme.com.br).

J.S.B. Stramandinoli, mestre em Engenharia Civil e aluna do doutorado no PPGEC/UFSC (e-mail: julianastramandinoli@hotmail.com).

enquanto que a metade inferior se movimenta em sentido oposto, provocando uma abertura da base. Já durante o período de enchimento o carregamento hidráulico sobre o talude de montante influencia no deslocamento da barragem, principalmente no talude de montante, onde o sentido do deslocamento na parte inferior deste talude é modificado. Isto pode ser verificado com dados de instrumentação de barragens.

Muito próximo aos taludes de montante e jusante o material está sujeito às maiores mudanças, principalmente em relação à tensão e à direção da tensão principal, devido à ausência de confinamento.

O máximo deslocamento vertical ocorre próximo a meia altura da barragem, devido a uma combinação favorável entre a camada subjacente e a pressão devida ao aterro sobrejacente. As camadas inferiores, embora sujeitas a elevadas pressões verticais, são de menor espessura e recalcam menos. Já no trecho superior as pressões são pequenas, apesar da grande espessura acumulada, e os recalques são também menores.

Durante o período de enchimento, os movimentos observados em diversas barragens mostram que estas se tornam mais rígidas. As tensões no interior da barragem se modificam, e em muitas zonas ocorre um alívio de tensões, sujeito a recarga em níveis mais elevados do N.A do reservatório. No caso de barragens de enrocamento com face de concreto há uma recompressão de enrocamentos após a fase de construção, devido à sobrecarga resultante do enchimento do reservatório.

Na figura 1 apresenta-se um exemplo dos deslocamentos, em centímetros, perpendiculares à face da laje de concreto de montante durante o período de enchimento de uma barragem de enrocamento com face de concreto de 126 m de altura.

A capacidade de estabelecer deslocamentos admissíveis ainda é limitada, e não há dados suficientes para se afirmar que uma determinada barragem será segura se os deslocamentos verticais e horizontais se limitarem a uma porcentagem de sua altura, largura, espessura ou qualquer outra dimensão de referência.

A tabela 1 mostra dados de deslocamentos horizontais observados em barragens. É interessante mencionar que a Barragem de Muirhead rompeu.

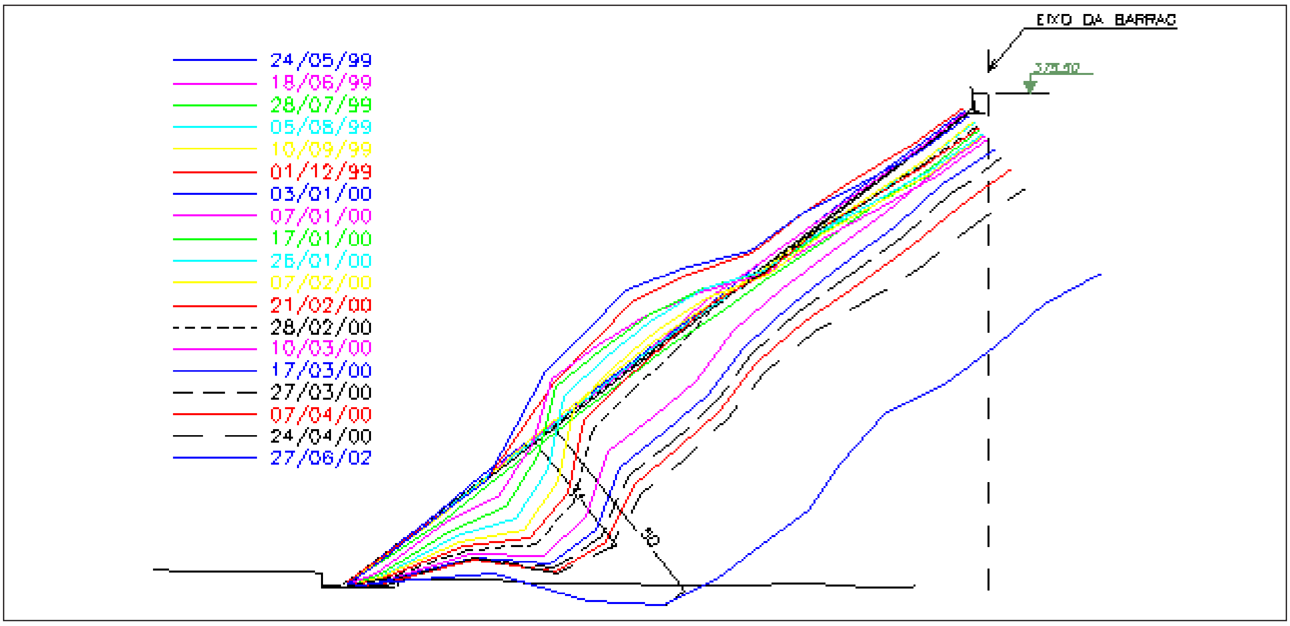

FIGURA 1- Deformação perpendicular à laje.

TABELA 1

DESLOCAMENTOS OBSERVADOS (PENMAN, 1982)

Barragem	Tipo	Altura (m)	Talude Médio	Máximo deslocamento horizontal medido ao final da construção	Máximo deslocamento horizontal como % da altura da barragem	Máxima taxa de deslocamento horizontal medido [illegible]
Gepatsch	Enrocam. c/ núcleo central de argila	153	1:1,5 d/s	1,0	0,65	11
Blowering	Enrocam. c/ núcleo central de argila	112	1:1,9 d/s	0,73	0,65	10
Llyn Brianne	Enrocam. c/ núcleo central de argila	90	1:1,75 d/s	0,61	0,68	20
Scammonden	Ent. c/ núcleo central argila incl. p/ montante	70	1:1,8 d/s	0,25	0,36	4
Gallows	Homogênea	48	1:3,2 u/s	0,50	1,0	33
Backwater	Homogênea	43	1:3 d/s	0,07	0,16	2
Derwent	Homogênea c/ núcleo de argila	36	1:2 a 1:3,5d/s	0,05	0,14	1
Muirhead	Homogênea com núcleo	22	1:2,9	1,5	6,8	150
Chew Stoke	Homogênea com núcleo úmido	11	1:2,5d/s	0,05	0,38	5

Uma maior atenção é dispensada para os problemas relacionados à face de concreto cujo comportamento depende fortemente das características de deformabilidade do aterro de enrocamento, principalmente no talude de montante. Com isto procura-se de diversas maneiras determinar parâmetros de deformabilidade que possam, de alguma forma, traduzir tendências de aparecimento de deformações importantes em regiões críticas do aterro.

Estatísticas mais recentes de acidentes em barragens de enrocamento indicam que o deslizamento de superfícies cinematicamente viáveis não ultrapassa 3% do número total de acidentes. São os mecanismos relacionados com a deformabilidade dos materiais que têm conduzido a maiores problemas, nomeadamente devido à interação entre o núcleo de argila e os maciços estabilizadores, bem como a passagem de água pelas cortinas do paramento de montante.

Barragens de enrocamento com face de concreto (BEFC) são ainda projetadas empiricamente, usando conceitos "guiados por experiência prática e não teórica" [24]. O uso de modelos numéricos está na maioria dos casos limitado para análise elástica, para predizer deslocamentos da barragem quando no primeiro enchimento e para monitorar seu comportamento ao longo de sua vida.

III. MODELOS DE PROJETOS ATUAIS

A. Modelos Elásticos Lineares

Os modelos elástico-lineares, por sua simplicidade, ainda são os mais utilizados pelos projetistas. Costuma-se admitir também que o material é isotrópico e neste caso as leis constitutivas ficam definidas por apenas dois parâmetros elásticos: o módulo de Young E e o coeficiente de Poisson. O módulo de Young pode ser obtido a partir de um ensaio de compressão uniaxial em laboratório.

A referência [21] foi um dos primeiros a relatar como desvantagem da utilização de modelos elástico-lineares na análise de barragens de enrocamento o aparecimento (que na realidade não ocorre) de elevadas concentrações de tensões, em virtude das quais surgem zonas de tração no maciço. Estas já não se verificam quando se usam modelos de elasticidade variável [20].

A referência [20] concluiu que a determinação experimental dos valores dos parâmetros das equações constitutivas é um dos fatores que mais influencia a qualidade das previsões e que os cálculos elásticos lineares têm freqüentemente conduzido a melhores resultados do que os baseados em equações constitutivas mais complexas.

Os modelos elásticos lineares para análise durante a fase de enchimento, não capturam os principais mecanismos de deformação de aterros de enrocamento, tais como: não linearidade, rotação de eixos principais de tensão, descarregamento, dependência do nível de tensões.

B. Modelos Elásticos Não-Lineares

Os modelos de elasticidade variável têm sido muito utilizados para descrever o comportamento dos solos.

Na interpretação matemática dos resultados dos ensaios laboratoriais, recorre-se a leis constitutivas do tipo elasticidade variável. Estas leis, que permitem a simulação do comportamento do material com um elevado grau de aproximação, têm sido também as mais utilizadas em análises de barragens de enrocamento.

Estes modelos são mais precisos do que os modelos elástico-lineares, além de mais fáceis de serem implementados computacionalmente do que os modelos elastoplásticos.

Dentre estes modelos destaca-se o modelo hiperbólico que tem a capacidade de incorporar trajetórias de descarregamento (fundamental na análise de enchimento) e modela o comportamento não linear da curva tensão deformação.

Este modelo é do tipo incremental, isotrópico e elástico com dois módulos elásticos, módulo de Young e módulo de variação volumétrica que variam com o nível de tensão cisalhante e de tensão confinante.

C. Modelos com Fases de Construção e Enchimento

Na referência [6] foi demonstrada a necessidade da utilização do cálculo incremental na aplicação de cargas de modo a simular a seqüência da construção do aterro por camadas. Eles compararam duas análises: uma com aplicação de cargas de uma só vez e outra com uma análise incremental constituídas por dez camadas. No cálculo incremental obtiveram-se os maiores assentamentos a meia altura da barragem, sendo nulos no coroamento e na base. Esta distribuição é bastante aproximada a dos valores reais medidos nas barragens de aterro. No entanto, no cálculo realizado considerando todas as camadas de uma só vez, obtiveram-se assentamentos máximos no coroamento da barragem e nulos na base, enquanto que os deslocamentos horizontais eram bastante aproximados nas duas hipóteses de cálculo.

Eles também verificaram que na análise de uma barragem homogênea, os valores dos assentamentos eram muito aproximados do real quando se admite um número de camadas entre sete ou catorze. Este fator simplifica consideravelmente a modelagem, não sendo necessária implementar todas as camadas construtivas, diminuindo assim o tempo de resolução e a capacidade necessária de memória do computador.

A medição de deslocamentos em um aterro é realizada instalando-se os medidores dentro do maciço à medida que se constrói o aterro. Para simular esta situação é necessário um procedimento de cálculo incremental, [6], no qual seguidamente são adicionadas novas camadas. Os deslocamentos são medidos a partir do momento em que a camada onde o medidor está instalado for construída.

Para evitar que deslocamentos de pontos sejam somados repetidamente, deve-se adotar a seguinte rotina:

- cada camada nova deve ser processada como se somente ela tivesse peso próprio e o restante do aterro tivesse peso especifico igual a zero;
- no final, quando todos os deslocamentos das diversas fases são somados, um ponto no meio da barragem terá recalcado somente devido a ação do peso próprio da camadas que foram construídas.

Como já foi dito anteriormente, não se utiliza no modelo para simulação da construção por etapas o mesmo número de camadas construtivas. Isto porém gera alguns problemas, pois se for adicionada ao modelo uma camada espessa, com rigidez igual a do resto da barragem, esta camada passará a funcionar como uma "viga", com distribuição de tensões peculiar e longe da realidade.

A forma que se utiliza para simular a construção das camadas de compactação é: a cada etapa adiciona-se uma camada, de baixo para cima. Considera-se na etapa (i) que a camada (i) tem peso próprio e as camadas inferiores não tem peso, conforme ilustra a figura 2. No final somam-se os deslocamentos nodais de todas as etapas.

FIGURA 2 - Análise Incremental Considerando Camadas construtivas: Etapa (i)

Na referência [13] recomenda-se, ainda, que se divida por 4 o módulo de elasticidade da camada (i), na etapa (i), para simular o fato que esta camada é menos rígida que as demais, por ainda não estar bem compactada. Neste trabalho não adotou-se este procedimento.

D. Simulação do Primeiro Enchimento

Após a construção, existem três fases de interesse para o cálculo em MEF:

- primeiro enchimento;
- operação em fluxo continuo;
- rebaixamento rápido.

Uma das fases mais críticas é a situação de primeiro enchimento pois verifica-se um apreciável acréscimo das cargas aplicadas às estruturas num período relativamente curto. No caso de barragens com face de concreto a montante, a carga hidrostática da água age diretamente na face de montante, condição mais simples de ser modelada, comparada a de uma barragem de enrocamento com núcleo de argila.

Se a fundação for compressível, poderá ser incorporada sob uma das três formas:

- fundação impermeável (figura 3);
- fundação permeável inicialmente seca, com uma cortina impermeável (figura 4);
- fundação permeável inicialmente saturada e com cortina impermeável (figura 5).

FIGURA 3 - Fundação Impermeável, [3]

FIGURA 4 - Fundação Permeável Inicialmente Seca, [3]

FIGURA 5 - Fundação Permeável Inicialmente Saturada, [3]

E. Modelos Elasto-Plásticos

Nas etapas iniciais dos cálculos numéricos de barragens de enrocamento tem-se recomendado e utilizado modelos elástico-lineares, enquanto que no caso de estudos paramétricos tem-se utilizado os modelos elasto-plásticos. Já o modelo hiperbólico [4], tem sido o mais utilizado nas análises de determinação dos deslocamentos e tensões de barragens de enrocamento. Uma das vantagens dos modelos elasto-plásticos em relação ao modelo hiperbólico é a possibilidade de se conhecer a cada instante de aplicação de cargas o valor das deformações plásticas, não apenas quando as cargas são aliviadas. Além disso, ele necessita de apenas dois parâmetros enquanto que o modelo hiperbólico necessita de sete ou mais.

F. Outros Modelos (Modelo Barragem + Laje)

O comportamento na interface entre a laje de concreto de montante e o enrocamento é bastante complexo. No método dos elementos finitos convencional, a compatibilidade das deformações impostas ao longo da interface tende a majorar os efeitos da transferência de cargas. Diferentes autores têm desenvolvido elementos especiais, chamados de interface ou de junta para levar em conta a ocorrência de movimentos relativos entre esses dois materiais.

Como exemplo, pode-se citar a análise das movimentações diferenciais entre a face e o maciço realizada para a barragem de Xingó, onde o modelo constitutivo utilizado para a

descrição do comportamento mecânico do enrocamento e do contato foi hiperbólico não linear e, para o concreto, o modelo constitutivo adotado foi o elástico-linear.

IV. PARÂMETROS DOS MATERIAIS

No cálculo de barragens, a caracterização dos materiais é um dos grandes problemas, pois o solo ou o enrocamento, além de heterogêneos, têm comportamento reológico muito diferente do aço, por exemplo, surgindo ainda a dificuldade de aproximar o seu comportamento por uma lei constitutiva adequada.

Na referência [13] apresentou-se as seguintes observações:

A obtenção de parâmetros dos materiais deve ser pesquisada a partir de:

1. dados observados de obras semelhantes,
2. ensaios de laboratório,
3. retroanálises de protótipos instrumentados incluindo aterros experimentais;
4. retroanálises baseadas nos primeiros estágios da construção da obra, quando análises são feitas concomitantes com a construção.

As opções 3 e 4 devem resultar nos parâmetros mais realistas. A opção 1 pode ficar prejudicada porque raramente duas barragens são iguais, ou executadas com os mesmos materiais, e por isso recorre-se a opção 2, ou seja, obter dados de ensaios em laboratório.

Um dos requisitos é que os ensaios reproduzam a trajetória de tensões de campo, ainda que de forma aproximada. O uso do ensaio edométrico para a obtenção dos parâmetros de rigidez para as etapas de construção é adequado, porque a tensão radial que se desenvolve é semelhante à trajetória de campo.

Resultados de ensaios e de instrumentação de aterros mostram que o enrocamento apresenta uma curva tensão deformação não linear e dependente do nível de tensão. Dados de literatura mostram que a compressibilidade de um enrocamento é fortemente relacionada com suas características físicas tais como coeficiente de uniformidade, forma dos grãos, porosidade bem como a resistência individual do bloco de rocha.

A compressibilidade de um material essencialmente granular é extremamente dependente das dimensões das partículas. Como é pratica comum remover as partículas maiores em ensaios de laboratório devido às limitações de equipamentos, torna-se necessário corrigir os parâmetros obtidos em laboratório para levar em consideração as dimensões reais do enrocamento. Para isso utiliza-se um fator de correção que depende da relação entre o diâmetro máximo ensaiado e o de campo [25].

O fator que parece mais se refletir na qualidade das análises efetuadas é o método de determinação dos parâmetros das leis constitutivas.

Na referência [9] é acentuada a importância das trajetórias de tensão e conseqüentemente da modalidade de ensaio na determinação das características mecânicas dos solos. Observou-se, em [14], que nos aterros de enrocamentos é muito variado o tipo de trajetórias de tensão embora, em termos médios, se caracterizem para a fase de construção, por um apreciável acréscimo de tensão média com ligeiros desvios da relação entre as tensões principais (comportamento aproximado dos ensaios de compressão unidimensional). Concluiu-se ainda [14], usando um modelo elástico linear (módulo de compressibilidade equivalente), que se obtêm razoáveis previsões para as deformações a partir dos parâmetros obtidos de ensaios de compressão unidimensional ou mesmo quando os enrocamentos são ensaiados em compressão triaxial com relações 3/ 1 próximas do coeficiente de impulso em repouso (variando de 0,25 a 1), ou ainda quando submetidos a estados ativos ou passivos desde que não se atinja situações próximas de ruptura.

Foi reforçado em [22] também a importância da modalidade de ensaio na determinação dos parâmetros de análise tensão-deformação de barragens de aterro.

Em qualquer previsão de deslocamentos verticais em barragens e suas fundações, é necessário considerar módulos de deformabilidade variáveis com o estado de tensões. Análises que consideram um único módulo de deformabilidade estão fadadas a erros grosseiros.

Foi apresentado em [17] uma metodologia para determinar indiretamente parâmetros da curva tensão deformação baseada nas características físicas e mecânicas de materiais de enrocamento, usando-se a experiência para estabelecimento de faixas de variação.

Define-se módulo como sendo a relação entre tensão e a deformação resultante. O módulo é relacionado com o sistema mecânico, isto é, com a maneira em que as tensões estão sendo aplicadas e com o grau de liberdade das deformações resultantes [9].

O módulo de Young é determinado através do carregamento uniaxial com deformações laterais livres e é dado pela razão entre a tensão vertical e deformação vertical. Por sua vez o módulo cisalhante G é determinado a partir de sistemas onde apenas deformações e tensões cisalhantes estão atuando.

Em estado de compressão isotrópica a relação tensão deformação é descrita pelo módulo de deformação volumétrica B. Em caso de confinamento lateral obtém-se o módulo unidimensional Mv. Este último é o único que pode ser obtido em instrumentação de recalques em enrocamento, em alguns pontos estratégicos onde as deformações laterais são nulas.

Na referência [14] sugere-se dividir a seção transversal da barragem em fatias e usar um módulo de deformação unidimensional correspondente à altura de cada fatia. Com isto pode-se traçar uma curva módulo unidimensional versus altura de cada fatia. Esta metodologia fornece valores razoáveis somente para a fase de construção em locais próximos ao eixo de simetria.

Durante o período de enchimento, os movimentos observados em diversas barragens mostram que estas se tornam mais rígidas, fazendo com que os módulos obtidos durante o período de construção não representem o comportamento do material durante esta fase da obra. Baseado na deflexão da membrana a montante [23] notou que o módulo obtido durante o período de enchimento, era da ordem de 3 a 4 vezes o módulo de construção. Ele denomina este módulo de módulo de elasticidade transversal. A referência [26] cita que tal comportamento ocorre devido a tensões de pré-compressão induzidas pela compactação.

O módulo de enchimento é dado por:

$$E_E = \frac{\gamma_w \, hd}{\Delta f} \qquad (1)$$

onde γ_w é o peso específico da água.

De acordo com [12] o fato do aumento das deformações do período de enchimento ocorrer quando são atingidos os últimos metros do nível do reservatório, pode estar ligado às variações do estado de tensão que ocorre durante a mudança do carregamento gravitacional para o carregamento hidráulico (rotação dos eixos principais).

V. ANÁLISE DO EFEITO DO NÚMERO DE CAMADAS CONSTRUTIVAS

Para investigar o efeito do número de etapas ou camadas no caso de carregamento de alteamento, adotou-se um modelo simplificado de barragem de enrocamento conforme utilizado [2], ilustrado na figura 6. A barragem tem 160 m de base e 30,48 m de altura e foi analisada pelo programa SAP2000. Devido à simetria em relação ao eixo vertical central da barragem, modelou-se apenas a metade da esquerda, colocando-se apoios pertinentes. Foram utilizados elementos de estado plano de deformação, isoparamétricos, quadriláteros de 4 nós e triangulares de 3 nós. Considerou-se a barragem construída com material homogêneo com as seguintes propriedades: módulo de elasticidade E = 70 MPa, coeficiente de Poisson ν = 0,3 e peso específico w = 25 kN/m^3. Foram efetuadas análises elástico-linear de elementos finitos utilizando-se o programa SAP 2000 (1997), considerando-se: a) 1 camada; b) 2 camadas; c) 5 camadas e d) 10 camadas construtivas, utilizando-se o procedimento descrito no item 3.3. A comparação das diversas análises é feita em termos de deslocamentos verticais (em módulo) ao longo da altura, na linha central da barragem.

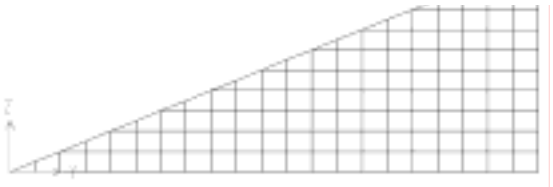

FIGURA 6 - Malha utilizada no estudo do no de camadas-SAP2000.

Na figura 7 apresenta-se o gráfico comparativo das diversas análises. Observa-se que, considerando-se apenas 1 camada construtiva, obtém-se o deslocamento vertical máximo (em módulo) no topo da barragem e à medida que se aumenta o número de camadas diminui o valor do deslocamento máximo e sua ocorrência desloca-se para o centro da barragem. A diferença relativa entre o deslocamento máximo obtido entre a análise com 1 e com 10 camadas é de 74,1% e entre a análise com 5 e 10 camadas é de apenas 15,1%. Nota-se também do gráfico que as curvas das análises com 5 e 10 camadas se aproximam, mostrando que há uma tendência de convergência. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por [2] e também por CLOUGH & WOODWARD apud [2], além de estar de acordo com as observações feitas em [6].

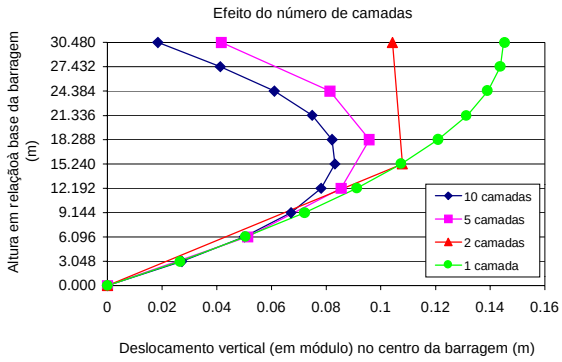

FIGURA 7 - Efeito do no de camadas no deslocamento vertical da barragem (linha central).

VI. EXEMPLO - ESTUDO DA BARRAGEM DE ITÁ

A. Análises Considerando as Camadas Construtivas

Primeiramente foi feita uma análise elástico-linear de um modelo simplificado da barragem de Itá, considerando apenas uma camada construtiva.

Entretanto, baseando-se nos resultados obtidos no item anterior, foi feita uma segunda análise, similar à primeira, porém considerando o caso de carregamento de alteamento dividido em 10 camadas construtivas.

As análises foram feitas no programa GEFDYN, sendo que para o caso de carregamento dividido em camadas construtivas, o programa possibilita o cálculo incremental com um determinado número de camadas (neste caso 10) automaticamente. Outros programas para realizar estes cálculos por etapas necessitam que o usuário faça um procedimento de cálculo incremental.

Ao comparar as duas análises (uma com aplicação de cargas de uma só vez e outra com uma análise incremental constituídas por dez camadas) obteve-se uma diferença significativa nos resultados, conforme o esperado.

As figuras 8 e 9 ilustram os deslocamentos horizontais e verticais (curvas de isovalores), respectivamente, obtidos da análise considerando uma etapa construtiva.

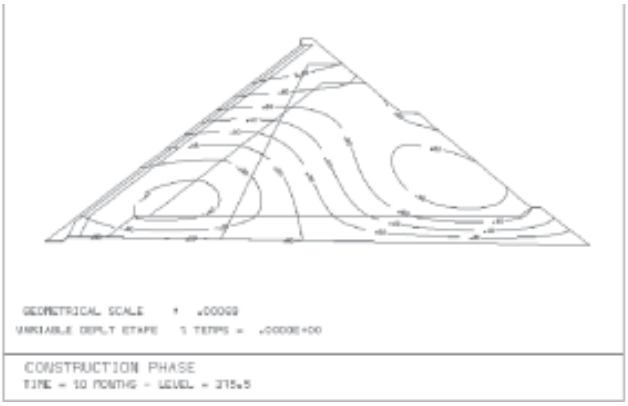

FIGURA 8 - Resultados da análise considerando 1 etapa construtiva (Deslocamento horizontal).

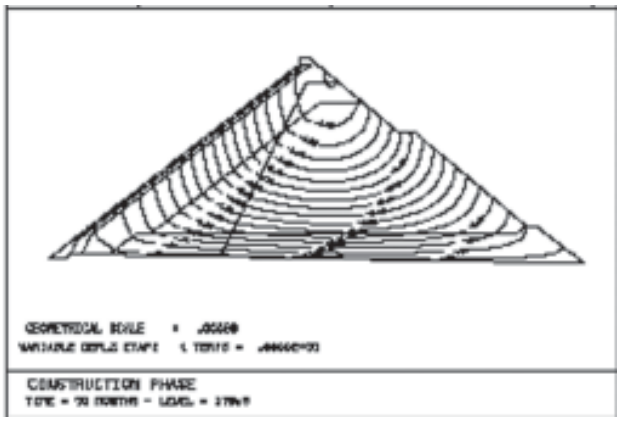

FIGURA 9 - Resultados da análise considerando 1 etapa construtiva (Deslocamento vertical).

As figuras 10 e 11 ilustram os deslocamentos horizontais e verticais (curvas de isovalores), respectivamente, obtidos da análise considerando 10 etapas construtivas.

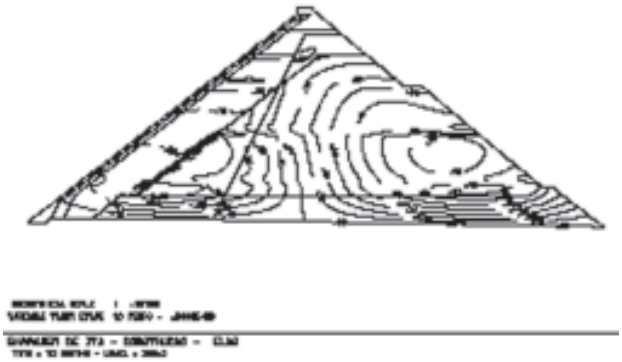

FIGURA 10 - Resultados da análise considerando 10 etapas construtivas (Deslocamento horizontal).

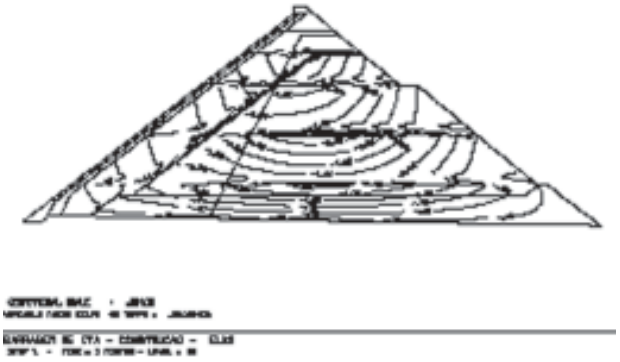

FIGURA 11 - Resultados da análise considerando 10 etapas construtivas (Deslocamento vertical).

Com relação aos deslocamentos verticais, observa-se das figuras 9 e 11 que para 1 camada construtiva o deslocamento máximo (em módulo) é obtido no topo da barragem (≈4,90m) e vai diminuindo ao longo da altura até a base da barragem, enquanto que para 10 camadas construtivas o deslocamento máximo (em módulo) ocorre no centro da barragem, a meia-altura (≈2,20m). Estes resultados estão de acordo com os obtidos nas análises do item anterior (ver figura 7) e com os obtidos por outros autores.

Também houve diferenças nas análises com relação aos deslocamentos horizontais, tanto no que se refere à distribuição como aos valores máximos. Observa-se da figura 10 que no topo da barragem os deslocamentos são positivos, indicando uma tendência de deslocamento de montante para jusante, enquanto na parte inferior à montante os deslocamentos são negativos, indicando a tendência de movimento oposto. Estes resultados estão de acordo com observações experimentais, discutidas anteriormente no item 2.

Pode-se concluir portanto que é primordial em análise de barragens de enrocamento considerar as camadas construtivas no carregamento de alteamento.

B. Análises Considerando o Carregamento de Enchimento

As análises realizadas para o caso de enchimento foram feitas através do programa SAP2000, considerando-se dois modelos diferentes:

- Carga de enchimento aplicada diretamente sobre o maciço (sem inclusão da laje);
- Carga de enchimento aplicada sobre a laje de concreto.

No primeiro caso foi considerada a carga de enchimento como aplicada diretamente sobre o enrocamento, sem o intermédio da laje. Neste modelo os módulos de elasticidade dos materiais do maciço têm seus valores dobrados e os coeficientes de Poisson diminuídos em 1/3, de acordo com [3] e [17]. Para análise do carregamento de enchimento foi utilizada uma malha composta de elementos retangulares de 4 nós e elementos triangulares de 3 nós que são perfeitamente compatíveis. A Malha está mostrada na Figura 12.

FIGURA 12 - Deformada da barragem(sem laje) quando sujeita ao enchimento.

Deslocamento vertical máximo (m) = -0,583
Deslocamento horizontal máximo (m) = 0,509

No segundo caso a carga foi considerada aplicada na laje, sendo essa discretizada através de elementos de barra.

TABELA 2

Deslocamentos do enrocamento com inclusão da laje e sem inclusão da mesma

Carga de Enchimento	Sem Laje	Com Laje
Desl. Horizontal(m)	0,583	0,466
Desl. Vertical (m)	0,509	0,505

Comparando-se os resultados da tabela 2, observa-se que os valores obtidos considerando-se a laje resultaram em deslocamentos menores com a análise sem a laje. Isto provavelmente ocorre pela característica de maior rigidez do material concreto comparado com o enrocamento, e esta pequena diferença obtida nos valores deve-se à espessura da laje ser significativamente menor que as demais zonas.

As figuras 13 e 14 mostram, respectivamente, os diagramas de momentos fletores e esforços normais na laje quando sujeita à carga de enchimento.

FIGURA 13 - Diagrama de momentos fletores na laje considerando a carga de enchimento.

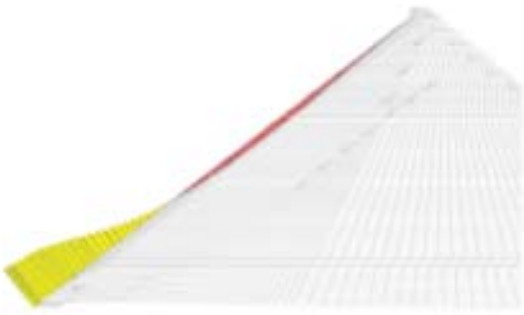

FIGURA 14 - Diagrama de esforços normais na laje considerando a carga de enchimento.

VII. ANÁLISE CRÍTICA DOS MODELOS DE ANÁLISE DAS BARRAGENS

Em função da revisão bibliográfica, pode-se perceber que a utilização de critérios empíricos ainda prevalece no projeto das barragens BEFC. Esses critérios são baseados na experiência prática, com uma visão profunda do comportamento geotécnico do enrocamento. Recentemente, a análise através de métodos numéricos vem ganhando importância e fornecendo resultados que melhoraram significativamente os conhecimentos sobre o comportamento dessas estruturas.

O enrocamento é considerado como o responsável pela estabilidade global da barragem, mesmo que haja passagem de uma certa vazão de água através dele, enquanto que a laje é considerada apenas como um elemento de vedação.

Entretanto, se a laje vai ser estudada não mais como um elemento de vedação e sim como um elemento estrutural, é necessário que se tenha um conhecimento adequado dos deslocamentos sofridos pela barragem, aos quais a laje vai ter que se adaptar e também dos esforços aos quais ela vai estar submetida. Esses deslocamentos e esforços devem ser conhecidos antes da execução da laje e, portanto, devem ser estimados através de uma análise numérica.

Os modelos numéricos utilizados nas análises das barragens pelas empresas projetistas ainda são, na grande maioria dos casos, modelos elásticos ou modelos simplificados de elasticidade variável. Em alguns casos está sendo incluído o efeito da construção por fases.

Os modelos mais importantes foram elaborados depois da construção das barragens, de modo a utilizar valores dos materiais obtidos através de ensaios, e principalmente os valores obtidos através de instrumentação para fazer a calibração desses modelos. Devido à grande sensibilidade dos resultados em função dos parâmetros dos materiais, os modelos mais sofisticados tem ficado restritos à área de pesquisa.

Em geral os modelos utilizados atualmente não levam em consideração o comportamento conjunto da laje de concreto. Acredita-se que a laje é muito flexível para influenciar os deslocamentos da barragem. Mesmo que a afirmação anterior seja verdadeira, o estudo do comportamento conjunto é essencial para a determinação dos esforços solicitantes da laje, principalmente os esforços normais (tração e compressão). Nesse sentido é de grande importância a representação adequada do contato entre a laje e o enrocamento.

VIII. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] P. Anthiniac, "Modélisation hydroplastique des enrochements de barrage en éléments finis", Tese de Doutorado, Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, pp 1-200, 1999.

[2] R. N. Azevedo Filho, " Análise do comportamento de barragens pelo método dos elementos finitos utilizando um modelo elasto-plástico " Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Outubro de 1990.

[3] P.T. Cruz, " 100 Barragens Brasileiras - Casos Históricos, Materiais de Construção, Projeto." ed. Oficina de Textos, p. 517, 1996.

[4] J.M. Duncan and C. Chang, " Nonlinear analysis of stress and strain in soils" - ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 96 no. SM5, pg. 1629-1654, 1970.

[5] GEFDYN - Coyne et Bellier - ECP / LMSS - MAT - ICMEH / EDF, abril de 1994.

[6] L. Goodman and C. Brown, -"Dead load stresses and the instability of slopes". ASCE, JSMFD, N° SM3, 1967.

[7] H. Imaizumi, A.E. Sardinha, "A Study of deformations in concrete faced rockfill dams", em 'Concrete Face Rockfill Dams - Design, Construction and Performance', Ed. J.B.Cooke & J.L.Sherard, ASCE, pp.528-540, 1985.

[8] R.L. Kondner, " Hyperbolic stress-strain response in cohesive soils" - ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 89, no. SM1, 1963.

[9] T.W. Lambe, R.V. Whitman, "Soil Mechanics". Wiley, New York, 1969.

[10] P.C.A. Maia, "Avaliação do Comportamento Geomecânico e de Alterabilidade de Enrocamentos". Tese de doutourado, Departamento de Engenharia Civil, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 351 p., 2001.

[11] B. Materón , "Transition material in the highest CFRDs", Hydropower & Dams, Issue Six, pp 33-40, 1998.

[12] R.T. Mori, "Deformações e trincas em barragens de enrocamento com face de concreto", II Simpósio sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, Anais, pp 47-60, 1998.

[13] D. Naylor, "Stress and strain laws and parameters values" , in Advances in Rockfill structures, Chapter 11, editado por E. Maranha das Neves, NATO ASI series, Kluwer Academic Publishers, 1991.

[14] A.D.M. Penman, J.B. Burland and J.A. Charles," Observed and predicted deformations in a large embankment dam during construction." Proc. of the ICE, v.49, May, 1971.

[15] M. Peixoto and F. Saboya Jr , "Análise de movimentações diferenciais entre a face e o maciço em barragens de enrocamento", II Simpósio sobre Barragens de Enrocamento com Face de Concreto, Anais, pp.119-128, 1998.

[16] F. Saboya Jr. and P.M. Byrne ," Parameters for stress and deformations analysis of rockfill dams" , Canadian Geotechnical Journal, Vol. 30, pg. 690-701, 1993

[17] F. Saboya Jr. , "Considerações sobre compressibilidade de enrocamentos e determinação de parâmetros para análise numérica de barragens de enrocamento com face de concreto", in Anais do II Simpósio sobre barragens de enrocamento com face de concreto, Florianópolis, pg. 99-110, 1999.

[18] SAP2000 Plus, "Integrated Structural Analysis and Design Software" Version 6.1, Computers and Structures, Inc., 1997.

[19] S. Singer, " Estudo Experimental da Resistência ao Cisalhamento dos Basaltos Desagregados e Desagregáveis de Capivara". Dissertação de mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 92 p, 1973.

[20] A.A. Veiga Pinto, "Previsão do Comportamento Estrutural de barragens de enrocamento", Proc. 53-11-7384, Lisboa, 1983.

[21] Boughton,N. - Elastic analysis for behaviour of rockfill -ASCE, JSMFD, N° SM5, 1970.

[22] Z. Eisenstein & S. Law, "The role of constitutive laws in analysis of embankments " -Aachen, 1979.

[23] M. D. Fitzpatrick, A. B. Cole, F. L. Kinstler & B. P.Knoop, " Design of concrete-faced rockfill dams".

[24] J.B. Cooke," The Development of Today's CFRD Dam" in Anais do II Simpósio sobre barragens de enrocamento com face de concreto, Florianópolis, pg 14-15, 1999.

[25] T. Rammanurthy & K.K. Gupta, " Prediction of the behavior of rockfill materials". Proceedings, 3rd Australian-New Zealand Conference on Geomechanics, Vol. 3:13-18, Wellington, (1980).

[26] V. F. B. Mello, Fourteenth International Congresso n Large Dams, Vol 5, Question 55, Discussions, Rio de Janeiro, 1982.