

Análise Crítica dos Critérios de Projeto da Laje de Concreto em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto

D. D. Loriggio, UFSC e P. R. Senem, Leme Engenharia Ltda.

RESUMO

Um tipo de barragem que tem sido atualmente utilizada no Brasil é a barragem de enrocamento que usa uma laje de concreto armado, na sua face de montante, como elemento de impermeabilização. E, em função do seu bom desempenho, essas barragens têm sido construídas com alturas cada vez mais elevadas.

Este trabalho apresenta os critérios de projeto atualmente utilizados para o projeto dessas lajes de concreto armado. Os critérios atualmente em vigor são basicamente empíricos, baseados na experiência de obras similares construídas em todo o mundo.

Entretanto, nas barragens maiores, tem sido constatada uma fissuração excessiva nessas lajes, aumentando consideravelmente a vazão através do corpo da barragem. Uma das conseqüências de um aumento do fluxo de água pelo enrocamento é um aumento dos deslocamentos do corpo da barragem, gerando uma preocupação adicional com a estabilidade da estrutura.

Alguns novos critérios têm sido propostos, mas ainda existe a necessidade de elaboração de critérios mais atuais. Este trabalho pretende analisar criticamente os critérios existentes, sugerindo diretrizes para a futura melhoria desses critérios.

PALAVRAS-CHAVE

Análise numérica, barragem de enrocamento, critérios de projeto, laje de concreto.

I. INTRODUÇÃO

A. Histórico

A construção de barragens pelo homem, para utilizações diversas dos recursos hídricos, já remonta a cerca de 5000 anos, conforme registros da barragem de Jawa, na Jordânia.

Não tão mais antigo é o registro do primeiro acidente com este tipo de estrutura, que foi a barragem de Kafara, no Egito, há aproximadamente 4600 anos.

O caráter empírico está presente, ainda hoje, no tratamento e elaboração dos projetos de barragens, principalmente as de enrocamento. Uma barragem de enrocamento

é definida como uma barragem na qual o enrocamento é o principal elemento estrutural.

O desenvolvimento de barragens desse tipo começou, principalmente, nos EUA, por volta de 1900, com a utilização de enrocamento não compactado com face de madeira. Inicialmente, as barragens comportaram-se satisfatoriamente com altura de até 75 m.

Barragens mais altas, entretanto, desenvolveram trincas na face e vazamento excessivo, em função da alta compressibilidade do enrocamento não compactado. As barragens ainda eram seguras, exceto quando transbordada, e quase todas ainda estão em serviço.

Entretanto, o alto custo de reparar as rachaduras da face e o vazamento nas barragens mais altas conduziu à baixa reputação dessas barragens.

Por volta de 1930, a Barragem de Enrocamento com Núcleo de Terra (BENT) ficou popular e durante vinte anos, aproximadamente, foram construídas muito poucas barragens de enrocamento com face de madeira.

A construção dessas últimas retomou por volta de 1950. Porém, uma vez mais, as barragens mais altas apresentaram problemas de vazamento e os custos eram excessivos.

Uma grande inovação aconteceu quando o enrocamento não compactado foi substituído por enrocamento compactado. Esta transição começou em 1955, e desde 1967 nenhuma barragem de enrocamento não compactado foi construída.

O enrocamento compactado alcançou um módulo de compressibilidade mais alto, o que permitiu o uso de uma face de concreto para um melhor comportamento, surgindo a Barragem de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC).

Para obter o módulo mais alto, o cilindro vibratório (usado inicialmente em construção de estradas) foi empregado e logo se tornou um equipamento padrão para construção de BEFC. Além de ressurgir a construção de barragens com face, o enrocamento compactado possibilitou a utilização de pequenas pedras de baixa resistência compressiva.

O uso de enrocamento compactado permitiu que as barragens fossem projetadas com deformação limitada, e, como resultado, foram construídas muitas BEFCs em todo o mundo, em números crescentes e com alturas crescentes.

O maior desenvolvimento em seu projeto foi o uso de uma face de concreto, inclinada, sem juntas de contração horizontais. Esta característica foi empregada, inicialmente

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. D. D. Loriggio, doutor, é professor titular do Departamento de Engenharia Civil da UFSC. LAE – Lab. de Análise de Estruturas, GRUPEX – Grupo de Experimentação e Análise de Estruturas (e-mail: loriggio@ecv.ufsc.br). P. R. Senem, mestre, engenheiro civil da Leme Engenharia Ltda (e-mail: senem@leme.com.br)

te, na Barragem de Piedras (Espanha), com 40 m de altura, concluída em 1970.

Seguindo o sucesso desta face de concreto em três barragens australianas (Pindari em 1970, Riacho de Canguaru em 1970, e Cethana em 1971), todas as barragens subsequentes, no mundo, foram projetadas dessa forma.

Após a construção da barragem de Cethana, com 110 m de altura, o desenvolvimento de BEFCs progrediu rapidamente em todo o mundo. As BEFCs modernas concluídas, que atingiram maiores alturas nos anos 70, 80 e 90, foram, respectivamente, Alto Anchicaya na Colômbia (140 m), Foz da Areia no Brasil (160 m) e Aguamilpa no México (187 m).

O comportamento e o aumento da altura de muitas BEFCs durante este período demonstrou que existe uma gama significativa de experiência a qual pode ser usada para construir, com confiança, barragens com mais de 200 m de altura

Entretanto, a preocupação com a segurança, desempenho e custo das obras de barragens, para os diversos fins, é uma questão de enfoque nacional e internacional, tornando-se necessário incorporar os desenvolvimentos do conhecimento e da tecnologia para a definição de critérios que irão resultar em estruturas mais confiáveis, mais otimizadas e com controle de segurança mais apurado.

A Tabela I apresenta uma lista das BEFCs mais altas do mundo, de acordo com Malaysian Timber Council.

TABELA I
BEFCs mais altas do mundo

Nome	País	Conclusão	Altura (m)
Aguamilpa	México	1993	187
Tianshengqiao	China	1997	180
Foz da Areia	Brasil	1980	160
Xingó	Brasil	1994	150
Salvajina	Colômbia	1983	148
Segredo	Brasil	1991	145
Alto Anchicaya	Colômbia	1974	140
Chuzza	Colômbia	1978	135
Messochora	Grécia	1994	135
Koman	Albânia	1986	133
New Exchequer	USA	1966	130
Golillas	Colômbia	1978	130
Khao Laem	Tailândia	1984	130
Shiroro	Nigéria	1984	130
Ciorata	Indonésia	1987	125
Itá	Brasil	2000	125
Machadinho	Brasil	2002	125
Reece	Austrália	1986	122
Neveri	Venezuela	1981	115
Paradela	Portugal	1958	110
Rama	Iugoslávia	1967	110
Cethana	Austrália	1971	110
Batang Ai	Malásia	1985	110

B. Detalhes Construtivos

Projetistas de barragens reconheceram, por muitos anos, que o caminho para a segurança de barragens é fornecer "linhas redundantes de defesa" contra comportamentos anormais.

Projetistas de modernas barragens seguem esse caminho de "projeto defensivo", usando a experiência para selecionar e incorporar, no projeto de barragens, medidas que forneçam proteção contra falhas catastróficas, mitiguem os efeitos de eventos imprevisos e forneçam múltiplas "linhas de defesa". Em geral, as medidas redundantes de segurança são incorporadas na barragem sem a ocorrência de custos adicionais excessivos ou atraso do cronograma de construção.

A principal função de uma barragem é conter o reservatório. Isto é acompanhado pela incorporação de um elemento impermeável no enrocamento. No caso de uma BEFC, a impermeabilidade depende de uma face de concreto e da fundação. A interface entre estes dois elementos é o plinto.

A solução que hoje se apresenta, e que já foi empregada em várias barragens no Brasil e no exterior, é a de enrocamento compactado, com uma face "delgada" de placas de concreto armado, com juntas somente no sentido longitudinal (paralelo ao talude), apoiadas sobre uma face compactada de material granular fino, por vezes tratado com emulsão asfáltica. As juntas horizontais, quando existem, são apenas de caráter construtivo.

As placas de concreto, na sua base, são interligadas ao plinto por juntas especiais que permitem o seu movimento provocado pelas deformações do maciço. A tendência dos movimentos na face de montante é de compressão na região central, onde as juntas tendem a se manter fechadas, e de tração no trecho superior e ao longo do perímetro, onde as juntas podem abrir. Os deslocamentos oriundos dessa movimentação, segundo Cooke (1982), variam com o quadrado da altura da barragem, e inversamente com o módulo de compressibilidade do enrocamento.

O plinto se apóia em rocha, desenvolvendo-se em toda a borda inferior da face de concreto, e recebe um tratamento igual ao usado para as fundações de concreto. A rocha de fundação também precisa ser tratada para o controle do fluxo. A junta perimetral envolve uma seqüência de "linhas de defesa" contra infiltrações, exigindo um detalhamento especial, com vários componentes de vedação.

Um detalhe interessante é o emprego de areia siltosa a montante da junta, que seria carregada por um eventual fluxo que viesse a ocorrer na junta, ajudando a colmatá-la e reduzindo a infiltração na mesma. A jusante da junta é necessário colocar um material granular que seja filtro da areia siltosa.

Com relação à compactação do enrocamento, é recomendado o uso de rolos vibratórios pesados e a execução de camadas de lançamento mais delgadas para a área de

montante da barragem, com o objetivo de reduzir as deformações na fase construtiva e, principalmente, na fase de enchimento do reservatório.

Além disso, pode-se proceder a um zoneamento interno da barragem, procurando utilizar ao máximo as escavações de caráter obrigatório, sem prejuízo dos requisitos necessários ao controle das deformações e à garantia de uma elevada resistência ao cisalhamento.

Na área de jusante, as camadas de lançamento podem ser ampliadas, mantendo-se, no entanto, o mesmo número de passadas do rolo vibratório. O emprego de água é recomendado para acelerar os recalques.

A deformabilidade dos enrocamentos varia com o nível de tensões aplicadas, mas também com o tipo de rocha, sua distribuição granulométrica e a forma dos blocos rochosos.

A estabilidade externa da barragem, com relação ao enrocamento, é praticamente garantida, pois mesmo em taludes mais íngremes, o ângulo médio dos mesmos é inferior a 40°, e são poucos os enrocamentos compactados que não tenham ângulo de atrito superior a 40°.

Já a estabilidade interna, considerando superfícies profundas, deve ser verificada para as envoltórias curvas de resistência.

Próximo à face de concreto, é necessário executar uma transição detalhada para apoio das lajes.

C. Instrumentação de Barragens

A deformabilidade das barragens constitui-se no principal problema que pode surgir. Ela decorre das deformações do maciço, que ocorrem de forma diferencial, solicitando de forma irregular o paramento, podendo causar fissurações.

Vários fatores influenciam nas deformações, entre eles (segundo H. H. Thomas, 1976):

- formato, dimensões e propriedades mecânicas do material matriz;
- espessura da camada de compactação;
- método de lançamento da camada, direção de movimento do rolo compactador e grau de compactação obtido;
- natureza da fundação;
- declividade da superfície de fundação, ao longo do eixo longitudinal e seções transversais;
- variação do nível d'água do reservatório;
- atividade sísmica da região.

As componentes de deslocamentos, consideradas nas análises de deformabilidade, são:

- deslocamento vertical (recalque);
- deslocamento horizontal na seção transversal;
- deslocamento horizontal na seção longitudinal.

Algumas características dos deslocamentos, segundo K. V. Taylor (1977), são:

- em vales tipo V, os recalques diferenciais poderão criar tensões de compressão, à medida que o vale se aprofunda, e tensões de tração nas ombreiras; em vales tipo U, as tensões

de tração nas ombreiras poderão ser bastante elevadas;

- os recalques são acompanhados, geralmente, por movimentos em direção ao centro do vale;
- as deformações máximas nas ombreiras ocorrem, em geral, pouco acima do nível da fundação;

Em geral, tem sido prática usual procurar forçar deformações no período construtivo, a fim de reduzi-las em regime de operação.

Para o monitoramento da estrutura, em vários pontos da barragem, tanto no enrocamento como na face de concreto, são instalados aparelhos de auscultação. Os resultados dessa instrumentação fornecem informações valiosas para a verificação das condições da barragem e das análises teóricas.

De uma forma geral, esses instrumentos são definidos e instalados para atender aos seguintes objetivos:

- possibilitar a verificação do atendimento das especificações técnicas e dos parâmetros de dimensionamento do projeto executivo, durante a construção e operação;
- monitorar as condições de segurança das obras durante o período construtivo e operacional;
- possibilitar a verificação da adequação de métodos construtivos novos ou alternativos;

Os tipos de instrumentos apropriados para a medida dessas grandezas são detalhados e especificados no projeto executivo, considerando, dentre outras, as seguintes características necessárias:

- sensibilidade;
- curso ou amplitude da faixa de grandeza a ser medida;
- precisão;
- durabilidade;
- robustez, de acordo com as condições de transporte e instalação na obra.

Dentre os instrumentos instalados para o monitoramento destacam-se:

- termômetros;
- extensômetros;
- tensômetros;
- medidores triortogonais de junta;
- inclinômetros;
- piezômetros;
- células de recalque, etc.

Cada tipo de instrumento, geralmente, tem sua indicação, localização, finalidade e requisitos básicos explicitados no projeto executivo.

II. CRITÉRIOS DE PROJETOS ATUAIS

A. Hipóteses Básicas

Os princípios de projeto adotados em 1966 pela Hydro-Electric Commission têm sido aplicados em várias barragens de enrocamento com face de concreto, e permanecem

sem mudanças substanciais até a atualidade.

Experiências mostram que a viabilidade das fundações em rocha para o plinto é, praticamente, o pré-requisito básico para este tipo de barragem.

Uma análise dos aspectos de projeto, para obter a melhor maneira de construir barragens de enrocamento com face de concreto, resultou nos seguintes princípios adotados:

- a) podem ocorrer se a mesma for construída em estágios, juntamente com a construção da barragem;
- b) deformações na face de concreto são largamente independentes de sua espessura e dependem, principalmente, dos movimentos do enrocamento; pequenas deformações planas estão associadas com pequenos deslocamentos normais;
- c) deformações na face de concreto dificilmente serão excessivas para uma barragem da altura da de Cethana (110 m), desde que técnicas corretas de colocação do enrocamento sejam usadas;
- d) como a maior parte da face está em compressão, as juntas entre as placas podem ser reduzidas em número e material de preenchimento fino deve ser evitado no restante das juntas. Juntas espessas são usadas para todas as juntas em compressão para limitar a abertura das juntas próximas ao perímetro.

Pelos exposto anteriormente, algumas decisões foram tomadas, a saber:

- de (a), decidiu-se concluir o enrocamento antes do início da face de concreto. Isto permitiu a adoção de inclinação maiores e a omissão de juntas horizontais;
- de (b), a espessura da face de concreto foi reduzida para aquela julgada adequada para a impermeabilidade e vida longa;
- de (c) foi considerado essencial molhar as superfícies de todas as partículas de enrocamento durante a colocação e compactação, de acordo com Terzaghi. O propósito deste procedimento era reduzir a resistência da rocha, particularmente em pontos de contato entre elas, tal que o máximo arranjo possível se estabeleceria durante a compactação e carregamento de peso próprio, importante para a construção da face de concreto;
- e, finalmente, para satisfazer (d), juntas espessas foram usadas para todas as juntas em compressão para limitar a abertura das mesmas próximas ao perímetro.

Atualmente, a única modificação aos princípios anteriores refere-se ao item (a) onde, pela experiência das barragens de Foz da Areia e Khao Laem, a construção da face de concreto juntamente com o enrocamento, em estágios, não é mais considerada prejudicial. É perceptível que o movimento relativo entre o enrocamento compactado e a face de concreto, o qual deve ocorrer durante a construção em estágios, não induz a grandes cargas de compressão no concreto e, conseqüentemente, grandes deformações.

Apesar disso, ainda há interesse em se executar a laje

de concreto somente depois da barragem ter alcançado uma certa altura, para que os deslocamentos que venham a ocorrer no enrocamento não tenham que ser absorvidos pela laje e pelas juntas.

Obviamente, este "atraso" depende das condições de desvio do rio, e da utilização da barragem parcialmente construída para o controle das cheias, uma vez que a ensecadeira de montante tem a sua altura calculada para cheias até uma determinada cota.

Em função dos princípios e decisões apresentados anteriormente, o projeto da face de concreto é baseado, atualmente, nas seguintes considerações:

- a) flexão pode ser ignorada pelo fato de que a laje é uniformemente apoiada em um enrocamento compactado e carregada hidrostáticamente;
- b) existem deformações de tração e compressão no plano da face, causada por mudanças de temperatura no concreto e deformações do enrocamento subjacente sob carga; estas deformações são independentes da espessura da laje;
- c) a espessura da laje deve ser suficiente para permitir compactação completa e uniforme do concreto, de modo a apresentar resistência e impermeabilidade, acomodar reforços e garantir durabilidade;
- d) a junta perimetral deve ser capaz de permitir movimentos significativos durante o enchimento do reservatório.

B. Critérios em Usos

Baseado nas considerações anteriores, os critérios de projeto atuais podem ser descritos da seguinte maneira:

- Espessura da Laje

A maioria dos autores utiliza a seguinte expressão para a espessura t da laje, em metros:

$$t = 0,30 \text{ m} + 0,002 \text{ h} \quad (1)$$

sendo h a altura da barragem, em metros, medida a partir do topo.

As lajes devem ser construídas apenas com juntas verticais de contração. As juntas horizontais adotadas em algumas barragens tornaram-se fonte de vazamentos. Somente juntas horizontais decorrentes de etapas construtivas dão recomendadas.

- Armadura da Seção Transversal

No exterior, na década de 70, a taxa de armadura adotada era de 0,7% em cada direção (horizontal e paralela ao talude), sendo reduzida para 0,6% e, na década de 80, para 0,4%.

Esta armadura, em vários projetos do Brasil, foi de 0,5% da seção de concreto. Em Foz da Areia, foi reduzida para 0,4% e, no projeto de Segredo, para 0,3% na armadura horizontal.

Esse valor representa um limite prático, porque a armadura é considerada necessária para o controle das fissuras de retração do concreto. Além disso, essa armadura é posicionada no centro da seção transversal.

A Tabela 2 apresenta uma relação de barragens construídas pelo mundo, baseadas nos princípios da Hydro-Electric Commission.

TABELA 2

Barragens baseadas nos princípios da Hidro-eletric Comission

Nome	Ano	Altura (m)	Compr. (m)	Espessura da laje (m)	Armadura por direção (%)
Wilmot	1970	35	138	0,25	0,7
Cethana	1971	110	215	0,30 - 0,52	0,5 (i)
Paloona	1971	38	159	0,25	0,6
Serpentine	1972	39	127	0,25	0,6
Mackintosh	1981	75	465	0,25	0,5
Tul-labardine	1982	26	200	0,25	0,5
Murchison	1982	94	200	0,30	0,5
Bastyan	1983	75	430	0,25	0,5
Lower Pieman	1986	122	360	0,30 - 0,42	0,5 - 0,4 (ii)
(i) $t = 0,30 + 0,002 h$				(ii) $t = 0,30 + 0,001 h$	

C. Outros Critérios

Existem alguns autores que utilizam outras expressões para a espessura da laje, tais como:

$$t = 0,30 m + 0,00357 h \quad (2)$$

ou

$$t = 0,30 m + 0,001 h. \quad (3)$$

D. Barragens de Itá e Machadinho

A espessura da laje de Itá foi dimensionada por (1), o que resultou em uma espessura que variou de 30 a 54 cm. A taxa de armadura adotada para a laje foi de 0,4% na direção paralela ao talude e 0,3% na direção horizontal.

A espessura da laje de Machadinho também foi dimensionada por (1), o que resultou em uma espessura que variou de 30 a 54 cm. Para o cálculo da armadura da laje foram determinados os deslocamentos na face de montante da barragem, devido ao enchimento, através de análises numéricas. Os deslocamentos assim obtidos foram aplicados como deslocamentos impostos na laje de concreto, gerando os momentos de dimensionamento ao longo da mesma.

Esse procedimento resultou em uma armadura simétrica posicionada em ambas as faces da laje até uma certa altura, a partir da qual utilizou-se a tradicional armadura central. As armaduras mínimas foram de 0,4% nas duas direções.

III. ANÁLISE NUMÉRICA DO ESTUDO CONJUNTO DA LAJE COMO O ENROCAMENTO

São apresentados a seguir alguns resultados de análises numéricas, pelo método dos elementos finitos. A figura 1 mostra os deslocamentos na face de montante de uma seção transversal da barragem de Itá, modelada somente com o enrocamento e posteriormente analisada in-

cluindo a laje na análise. Maiores informações sobre a análise numérica podem ser encontradas em [14].

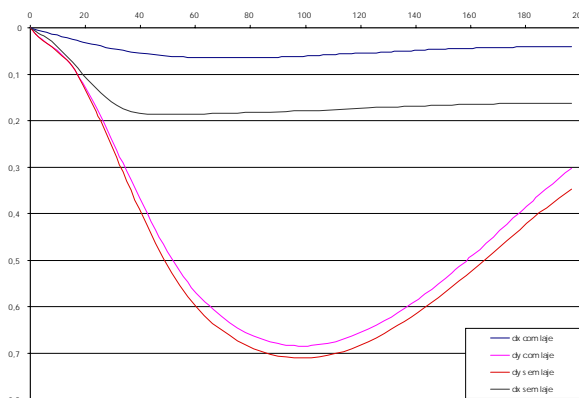


FIGURA 1 - Comparação de deslocamentos na face da barragem (modelos com e sem a laje)

Verifica-se, portanto, que a laje pouco altera os deslocamentos perpendiculares à sua direção, mas forneceu um aumento considerável da rigidez na direção axial.

O modelo no qual a laje foi incluída no processamento, como elemento de barra, fornece diretamente esforços normais e momentos fletores. As figuras 2 e 3 mostram esses esforços solicitantes comparados com os esforços solicitantes resultantes da imposição dos deslocamentos obtidos no modelo do enrocamento isolado em uma laje de comportamento elástico linear.

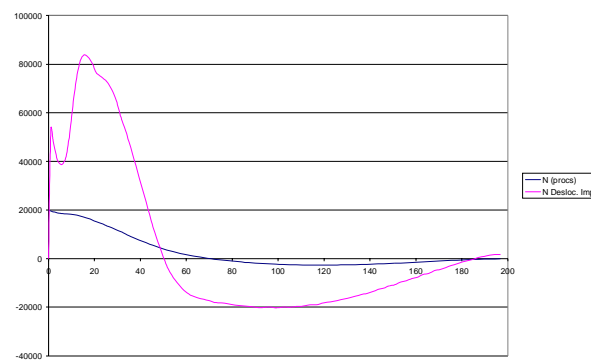


FIGURA 2 - Comparação de esforços normais

Os resultados dessa comparação mostram claramente o efeito da rigidez axial da laje no comportamento conjunto. Os esforços são bem diferentes nos dois modelos, atingindo valores bastante elevados em ambos os casos. Esses valores só seriam desenvolvidos se a laje tivesse um comportamento perfeitamente elástico-linear. Com a fissuração e possíveis movimentos relativos entre a laje e o enrocamento, esses valores tendem a diminuir.

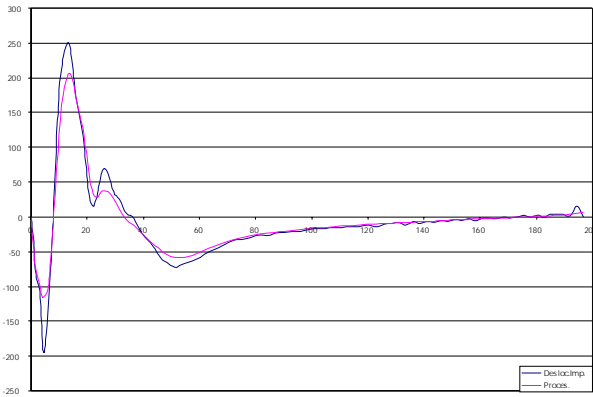


FIGURA 3 - Comparação de Momentos Fletores.

Também neste caso, os momentos fletores apresentados seriam desenvolvidos na laje caso esta possuísse comportamento elástico-linear. Com a fissuração devido à flexão, a laje passaria a funcionar próximo do Estádio II com rigidezes bem menores, e conseqüentemente, os momentos fletores diminuiriam muito.

Essa estrutura é particularmente sensível à variação das rigidezes axial e de flexão da laje. São apresentados a seguir os resultados de uma análise numérica, onde foram utilizadas áreas e inércias reduzidas. Foram utilizadas as inércias do estádio II. Os resultados encontrados estão apresentados nas figuras 4,5 e 6.

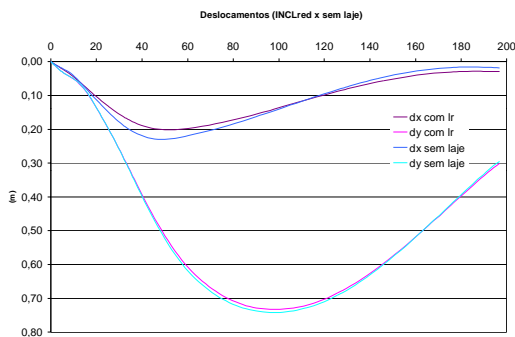


FIGURA 4 - Comparação de deslocamentos

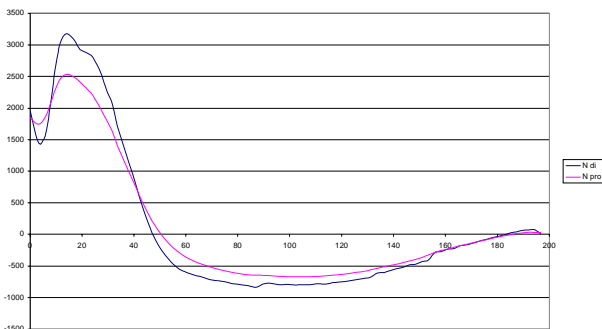


FIGURA 5 - Comparação de Esforços normais

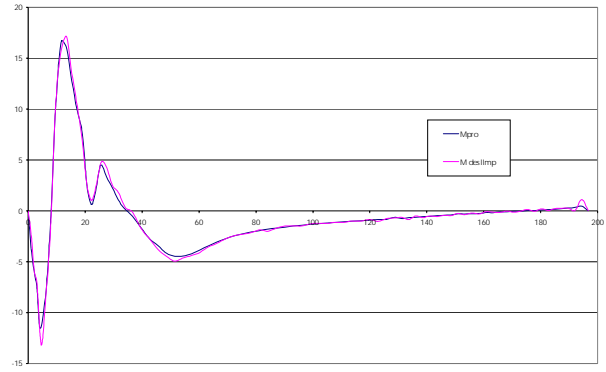


FIGURA 6- Comparação de Momentos Fletores

Como se pode perceber, com áreas e inércias reduzidas, as diferenças entre o processamento sem e com laje diminuem sensivelmente e os esforços solicitantes diminuem. Estudos futuros devem introduzir rigidezes proporcionais ao nível de solicitação de cada ponto da laje. Esses valores podem ser obtidos de Diagramas Momento Fletor x Curvatura para o nível de esforço normal considerado.

IV. ANÁLISE CRÍTICA DOS CRITÉRIOS DE PROJETO DAS LAJES

Os critérios de projeto das lajes são, na grande maioria dos casos, empíricos, tanto no que se refere às espessuras, quanto às taxas de armadura. Provavelmente isto se deve ao fato das lajes não serem consideradas como um elemento estrutural, e sim como um elemento de vedação.

Os critérios empíricos se mostraram ineficientes em alguns casos, principalmente em barragens de grande altura, e precisam ser atualizados. A fissuração apresentada por algumas lajes foi responsável pelo aumento considerável da vazão através do corpo da barragem. Uma das conseqüências desse fluxo de água pelo enrocamento é um aumento considerável dos deslocamentos do corpo da barragem, gerando uma preocupação adicional com a estabilidade da estrutura.

O aumento da espessura em função da altura da barragem tem como justificativa um aumento da função impermeabilizante da laje, mas essa função vai depender de uma série de outros fatores, principalmente da fissuração. Um aumento da espessura da laje pode acarretar um aumento significativo dos esforços de flexão.

Alguns autores e consultores afirmam que a laje funciona como uma membrana, e que não vai estar submetida a esforços de flexão. Como o maciço de enrocamento se deforma em função do enchimento do reservatório, a laje tende a se adaptar a esses deslocamentos e a afirmação anterior só será válida se a laje for bastante flexível, ou seja, com pequenas espessuras.

Os esforços que aparecem na laje também vão depender da ligação entre a laje e o maciço de enrocamento. Acredita-se que se a laje tiver possibilidade de escorregar ao

longo da ligação, isto deve diminuir os esforços normais aos quais ela vai estar submetida.

O critério adotado para Machadinho já foi um avanço em relação aos critérios anteriores já que levou em consideração, no dimensionamento, o comportamento à flexão. Mas esse critério, se fosse aplicado em lajes com espessuras menores, forneceria menores momentos fletores e menores armaduras, E tanto maior seria a economia, quanto menores fossem as espessuras. O efeito inverso ocorreria com lajes de espessuras maiores.

Além disso, o critério não considerou o efeito do esforço normal nas lajes. E não considerou a possibilidade de plastificação e deformações plásticas, que podem fornecer dimensionamentos bem mais econômicos, desde que sejam feitas as devidas verificações de ductilidade da peça.

As taxas de armadura adotadas são bem maiores que as mínimas exigidas por norma. Mesmo que se pretenda que a armadura resista a esforços oriundos de retração e variação de temperatura, ainda assim deve haver a possibilidade de diminuição dessas armaduras, principalmente a transversal.

Finalmente, o posicionamento da armadura no meio da altura da laje não respeita os critérios usuais de dimensionamento e detalhamento de peças estruturais de concreto armado. A mesma armadura dividida e colocada em ambas as faces da laje deve fornecer um desempenho estrutural muito superior.

Segundo as várias normas existentes, nas peças fletidas a posição da armadura mínima deve ser determinada pela região tracionada. Para peças onde a flexão possa ocorrer em ambas as faces as armaduras devem ser dispostas nas duas faces na quantidade prescrita para a maior armadura mínima entre a de flexão e a das deformações impostas.

Não foi encontrado nenhum caso, em normas, onde é recomendado dispor a armadura no centro da laje. A armadura de transferência, que é posicionada no centro e usada em pavimentos de concreto, como foi descrita, não tem a função de evitar as fissuras. No caso de haver tração em toda a seção transversal da laje a armadura mínima, para tirantes, deve ser distribuída igualmente nas duas faces.

Novos critérios para o projeto de lajes são, portanto, necessários. Eles devem considerar que as lajes devem se adaptar aos deslocamentos que o enrocamento vai apresentar, e resistir aos esforços normais aos quais elas vão ser submetidas. Esses deslocamentos e os respectivos esforços solicitantes devem ser obtidos através de uma análise numérica que inclua o comportamento conjunto da laje e do enrocamento.

É possível pensar em dimensionamentos de armadura considerando a formação de charneiras plásticas, que aumentariam a capacidade da peça em se adaptar aos deslocamentos do maciço, com maior economia. Nesse caso, a verificação da ductilidade da seção transversal da laje e das condições de fissuração em serviço são essenciais.

V. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CNEC. UHE Machadinho. Estudo complementar do comportamento tensão-deformação para projeto da face de concreto. 2000.
- [2] CNEC. UHE Machadinho. Laje do paramento - memória de cálculo. 2000.
- [3] J. B. Cooke, "Progress in rockfill dams". The eighteenth Terzaghi lecture. A.S.C.E. Annual Convention, Oct. 1982.
- [4] Paulo Teixeira da Cruz, "100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto". São Paulo: Oficina de Textos, 1996.
- [5] M. D. Fitzpatrick, A. B. Cole, F. L. Kinstler and B. P. Knoop, "De-sign of concrete-faced rockfill dams."
- [6] M. D. Fitzpatrick, T. B. Liggins, L. J. Lack and B. P. Knoop, "In-strumentation and performance of cethana dam." Transaction of the eleventh ICOLD, vol. III, p. 145. Madrid: 1973.
- [7] P. B. Fusco, "Técnica de armar as estruturas de concreto". São Paulo: Ed. Pini, 1995.
- [8] F. Leonhardt and E. Monnig, "Construções de concreto". Vol . I, II e III. Ed. Interciência.
- [9] MTC - Malaysian Timber Council. www.mtc.com.my.
- [10] L. A. Schmidt, "Dix river dam." Transactions of the ASCE, vol. 125, part II, p. 74. 1960.
- [11] K. V. Taylor, "Design of rockfill dams." Handbook of Dam Engi-neering. 1977.
- [12] H. H. Thomas, "The engineering of large dams." John Wiley and Sons, Inc, 1976.
- [13] J. K. Wilkins,;W. R. Mitchell, M. D. Fitzpatrick and T. Liggins, "The design of cethana concrete face rockfill dam." Transaction of the eleventh ICOLD, vol. III. Madrid: 1973.