

ANÁLISE COMPUTACIONAL DE UMA BARRAGEM EM CONCRETO

COMPUTATIONAL ANALYSIS OF A CONCRETE WEIR

Vitor Hugo Lopes Branco (1); Carlos Rodrigo Costa Rossi (1);
Dênio Ramam Carvalho de Oliveira (2)

(1) Mestrando em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará

(2) Professor Doutor, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará
denio@ufpa.br

Rua Augusto Corrêa, Número 01, Guamá-Belém-Pará-Brasil. CEP: 66075-970

Resumo

O problema energético na Jamaica é apenas uma pequena amostra da crise energética global. Para se adequar ao preceito de desenvolvimento sustentável e ambientalmente mais correto possível, o governo jamaicano optou pela execução de uma barragem de concreto armado ao longo do Great River. Este rio, no entanto, apresenta algumas particularidades como leito rochoso e com baixa declividade, caudaloso em alguns trechos e é utilizado para prática de navegação e canoagem, sendo esta última um esporte de forte atrativo turístico do país. Devido à sua suave inclinação, optou-se pela construção de uma barragem em concreto armado e um canal lateral auxiliar para direcionar parte do fluxo do rio para um túnel de aproximadamente 2 km, que descarrega na casa de força do complexo. Este trabalho apresenta a metodologia empregada para definição das diversas variáveis que envolvem o projeto, desde as técnicas empregadas no levantamento topográfico, que viabilizaram a definição do local das estruturas, até o modelo numérico desenvolvido para a análise do comportamento estrutural da barragem.

Palavra-chave: barragem, concreto armado, energia

Abstract

The energetic problem in Jamaica is just a little sample of the global energetic problem. To fit to the self sustainability concept and as correct as possible to the environmental politics, the Jamaican government decided to construct a reinforced concrete weir along the Great Rive. This river has some particularities as rocky natural channel and small declivity, flowing stretches and is used to navigation and rafting, which is a important touristic attractive of the country. Due to it's declivity a reinforced concrete weir was chosen to be built, with a concrete lateral channel to drive part of the water flow to a reinforced concrete tunnel with 2 km length, which leads the water to the power house. This paper presents the complete methodology to define, for example, the place to build the structures, regarding the applied topographic techniques to check and study the level curves till the computational model (MEF) to analyze the structural behavior.

Keywords: weir, reinforced concrete, energy.

1 INTRODUÇÃO

Barragens são projetadas com diversos propósitos, como para satisfazer as necessidades do consumo humano, de irrigação, de geração de energia elétrica e abastecimento de água e fins domésticos e industriais, regularização de rios e vazões. A construção de barragens é tão antiga quanto a História do homem e há registros da construção de barragens em praticamente todas as culturas. Os registros históricos, assim como as descobertas arqueológicas, indicam que a construção das barragens data de aproximadamente de 3000 anos A.C. naqueles pequenos barramentos era usado como principal material de construção o solo “compactado por pisoteio”. Tinham como finalidades básicas proteger povoados ribeirinhos em épocas de chuvas ou, ao contrário, acumular água em regiões mais áridas. Embora tanto o número como a altura das barragens tenha crescido significativamente no século XX, a prática de construir barramentos em rios, com o objetivo de reservar a água para consumo, para irrigação, e mesmo para mover rodas d’água, foi uma constante na História da Humanidade. Em tempos “mais recentes” a Holanda tornou-se exemplo clássico de uso de barragens na proteção (e até expansão de áreas) de terras férteis, contra invasões das águas do mar, na maré alta.

Uma das necessidades supridas pela barragem é a geração de energia. A energia possui um caráter estratégico não somente como uma força motriz da economia e do país como um todo, mas também como uma variável imprescindível para promover a qualidade de vida. A importância da energia assume, portanto, contornos tanto coletivos quanto individuais, servindo como fomento para o progresso técnico e científico, e com isso estimulando novos hábitos de consumo e novas demandas em termos de geração e eficiência energética. Como o problema energético na Jamaica também está inclusa na crise energética global. O governo jamaicano optou pela execução de uma barragem de concreto armado ao longo do Great River, como mostra a Figura 1.

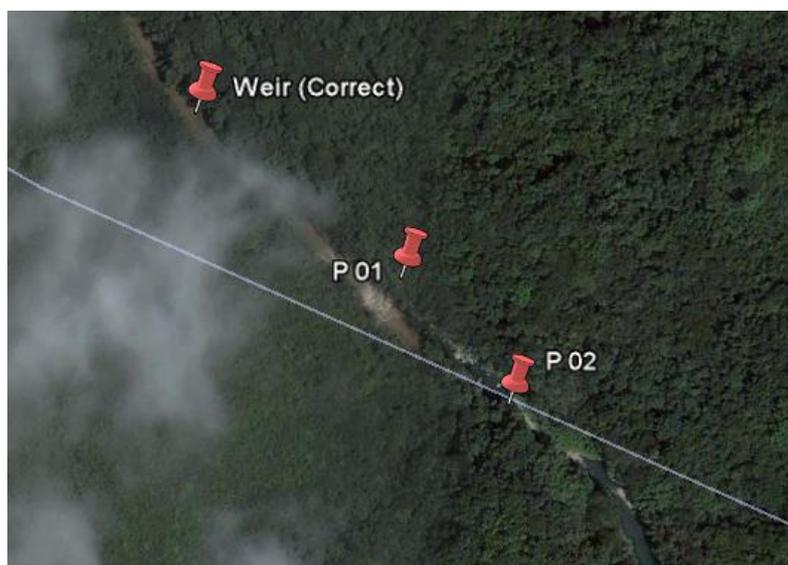


Figura 1 – Great River na Jamaica, latitude 18°25’3,74” e longitude 77°58’56,85”.

1.1 BARRAGEM DE ENROCAMENTO

SCANDIUZZI e OLIVAN (2007), as barragens de enrocamento podem ser definidas como sendo estruturas com seção transversal trapezoidal, formadas por blocos de rochas trituradas com dimensões máximas da ordem de até 150 cm, lançadas simplesmente (técnica em desuso) ou lançadas e compactadas em camadas (técnica atual), e que são estáveis pelo formato e peso próprio. Estas estruturas não são por si só impermeáveis, necessitando, portanto, de uma membrana impermeabilizante auxiliar para reter água. Esta membrana pode ser colocada ou na face de montante ou na seção central longitudinal da barragem, ilustrada na Figura 2.

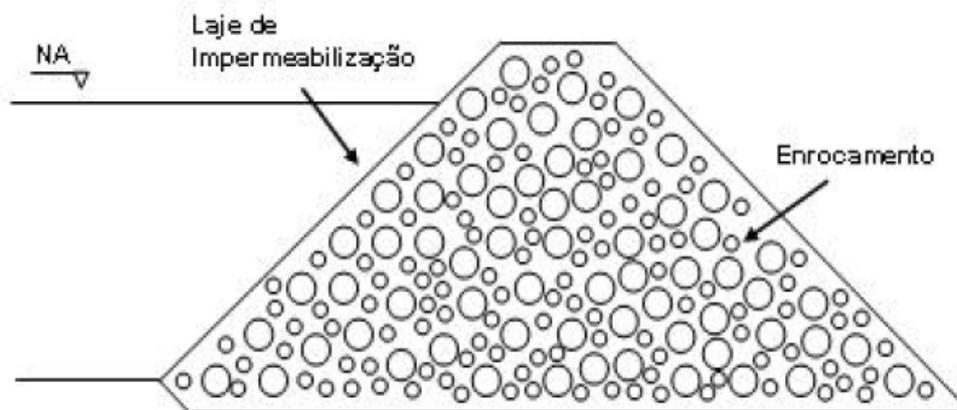


Figura 2 – Barragem de enrocamento

Assim, deve-se ter uma maior atenção na interface (contato de dois materiais diferentes) e por se caracterizar como uma descontinuidade, porque materiais diferentes se comportam de forma diversa, ocorrerá uma descontinuidade de tensões e de deformações, além de se criar um contraste de permeabilidade e, por consequência, de fluxo. O que ocorre na interface é uma transferência de tensões, causada pela diferença da deformabilidade e da resistência dos dois materiais justapostos. Em alguns casos podem ocorrer vazios, que acarretam fluxos concentrados e que podem por em risco a segurança da barragem. ALBUQUERQUE JÚNIOR (1993) relacionou alguns fatores que influenciam características geomecânicas de enrocamentos conforme a tabela 1.

Tabela 1- Fatores que influenciam características geomecânicas de enrocamentos
(ALBUQUERQUE JÚNIOR (1993) – com modificações).

Fatores	Observações
Granulometria	Maior uniformidade aumenta a compressibilidade
Índice de Vazios	Maior densidade diminui a compressibilidade
Forma das partículas	Partículas angulares sofrem maior fraturamento
Molhagem	Água aumenta a compressibilidade
Resistência dos grãos	Menor fraturamento aumenta a resistência
Tamanho e textura	Tamanho maior causa mais fraturamento
Tipo de carregamento	Menor compressão sob deformação plana
Grau de alteração	Enrocamento alterado sofre mais fraturamento
Mineralogia	Afeta o coeficiente de atrito
Velocidade de carregamento	Não tem influência significativa.

As barragens de enrocamento são classificadas em Barragens de Enrocamento com Núcleo Central (BENC) e Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC), foco da análise do trabalho. Apesar da barragem de enrocamento ter sido construída em diferentes partes do mundo e estarem operando satisfatoriamente, os critérios de projeto são ainda predominantemente empíricos, baseados na experiência obtida de obras similares já construídas. A utilização da análise não é uma ferramenta usual para o desenvolvimento e dimensionamento deste tipo de barragem, principalmente pela dificuldade de obtenção de parâmetros dos enrocamentos, conforme PACHECO (2003).

Uma barragem de enrocamento com face de concreto apresenta duas fases distintas de solicitação: inicialmente ela é submetida apenas ao peso próprio das camadas à medida que sobe o maciço; depois com o enchimento do reservatório, a pressão hidráulica. As conseqüentes deformações são indicadas esquematicamente na Figura 3.

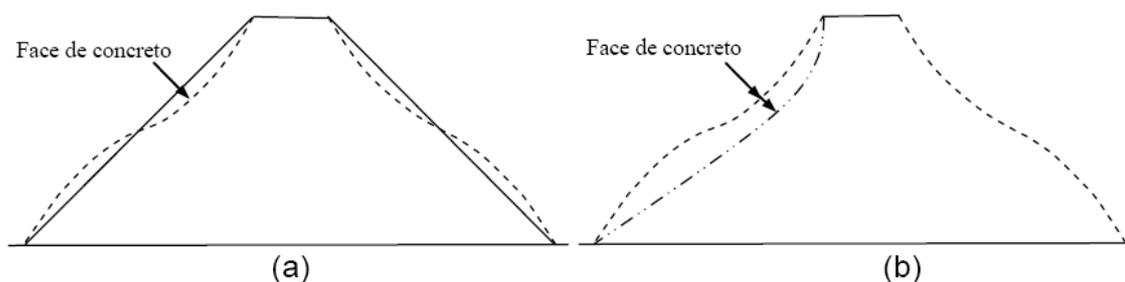


Figura 3 – Deslocamento experimentalado por uma seção transversal de uma BEFC: a) Final da construção; b) Após o enchimento (MORI (1999)).

Durante o período construtivo ocorrem deformações e recalques significativos. Os deslocamentos horizontais se caracterizam por apresentarem uma movimentação dos espaldares para o centro na metade superior da barragem, provocando um estreitamento, enquanto que a metade inferior se movimenta em sentido oposto, provocando uma abertura da base conforme apresentado na Figura 3a. Já na fase de enchimento a pressão hidráulica influencia no deslocamento da barragem, principalmente no talude de montante, onde o sentido do deslocamento na parte inferior deste é modificado como apresentado na Figura 3b.

1.1.1 Empuxos

Os empuxos são resultado das pressões atuantes na interface e dependem dos seguintes fatores: inclinação da interface; transferência de tensões na interface devido às diferenças de deformabilidade entre o concreto e o solo e/ou o enrocamento e; pressões piezométricas resultantes do fluxo da água na interface.

As diferenças de inclinação na interface resultam em diferentes formas de transmissão de esforços, devido às forças de “adesão” e de “atrito” que se desenvolvem entre o solo e/ou o enrocamento e o concreto. O que ocorre de fato é um alívio das tensões verticais na interface e nas proximidades do muro, e as pressões de contato acabam por ser influenciadas diretamente por esse alívio de tensões.

Idealmente, o que se deseja é que o solo possa se deformar sem a interferência do muro, ou seja, sem alívio das tensões, para que as pressões de contato sejam sempre superiores às pressões piezométricas u resultantes do fluxo de água. Se u for maior que a pressão total, a pressão efetiva será negativa (ou nula) e a água irá progressivamente deslocando o solo do muro, abrindo uma “cunha de água” que avança para jusante, podendo resultar num piping (erosão interna). A estimativa das pressões atuantes no muro é um dos grandes desafios da Mecânica dos Solos, porque, mesmo dispondo de recursos numéricos sofisticados de cálculo (MEF e outros), os parâmetros de entrada são de difícil avaliação, conforme CRUZ (1996); entretanto esse é o meio mais usado atualmente e se aproxima mais da realidade.

2 ANÁLISE NUMÉRICA

De acordo com CHUQUIMUNI (2005), a introdução do MEF na engenharia geotécnica foi feita por CLOUGH & WOODWARD (1967), na análise do comportamento de uma barragem de terra usando lei construtiva não linear, o que tornou de imediato evidente o potencial de sua aplicação na análise do comportamento de vários outros problemas da mecânica dos solos e das rochas. CHUQUIMUNI (2005) acredita especificamente no caso da previsão do fator de segurança em análises da estabilidade de taludes, que a primeira utilização do MEF tenha sido feita por KULHAWY et at.(1969).

O programa de Elementos Finitos usado foi o SAP2000 que tem como características: análises estáticas e dinâmicas; análises bidimensionais e tridimensionais; possui uma ampla biblioteca de elementos finitos que permite modelar vários tipos de estruturas e; utiliza o modelo elástico linear para representar o comportamento dos materiais. Após análise da estrutura, o programa fornece como resultados: deslocamentos, tensões, diagramas de esforços solicitantes e reações devidas ao carregamento.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA BARRAGEM

A estrutura modelada foi uma barragem de enrocamento de face de concreto com núcleo de concreto massa face externa de concreto de 21 MPa (3000 PSI) como mostrado na Figura 4. A modelagem numérica da estrutura e os comportamentos da mesma devido o peso próprio e a pressão de água a montante são ilustradas nas figuras 5, 6 e 7, respectivamente.

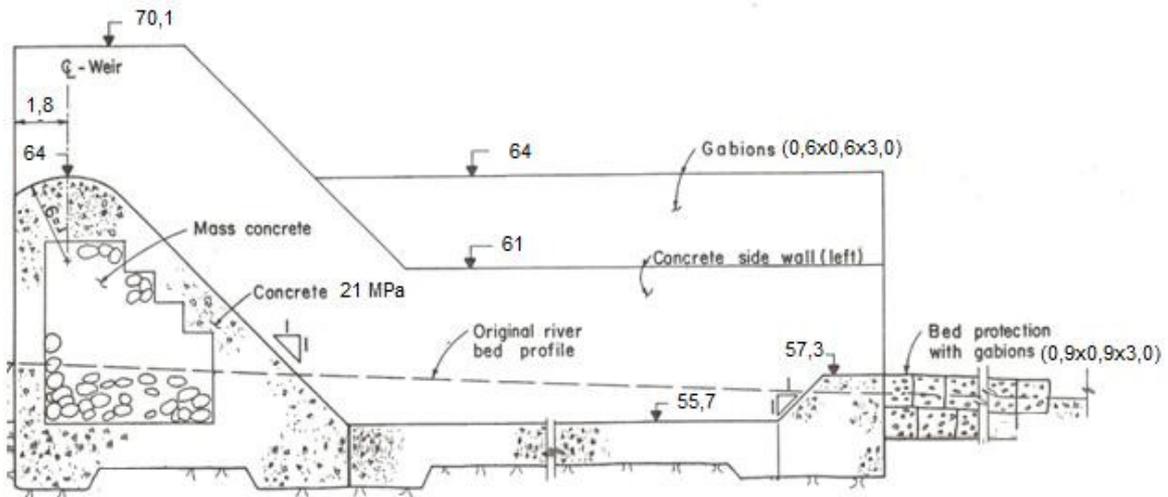


Figura 4 – Seção da barragem, cotas em metro (Fonte: LAHMEYER INTERNTIONAL 1984).

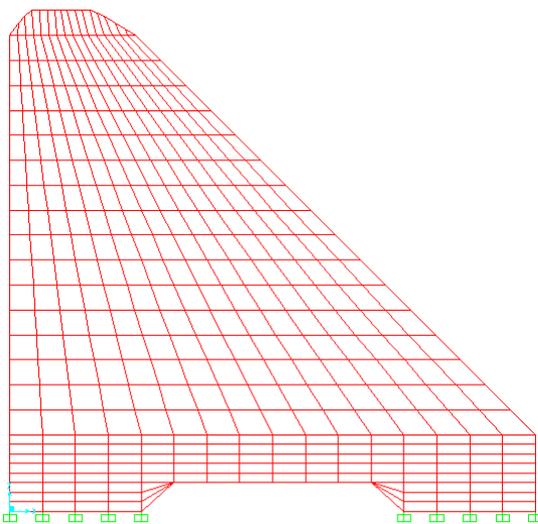


Figura 5 – Modelo numérico da barragem

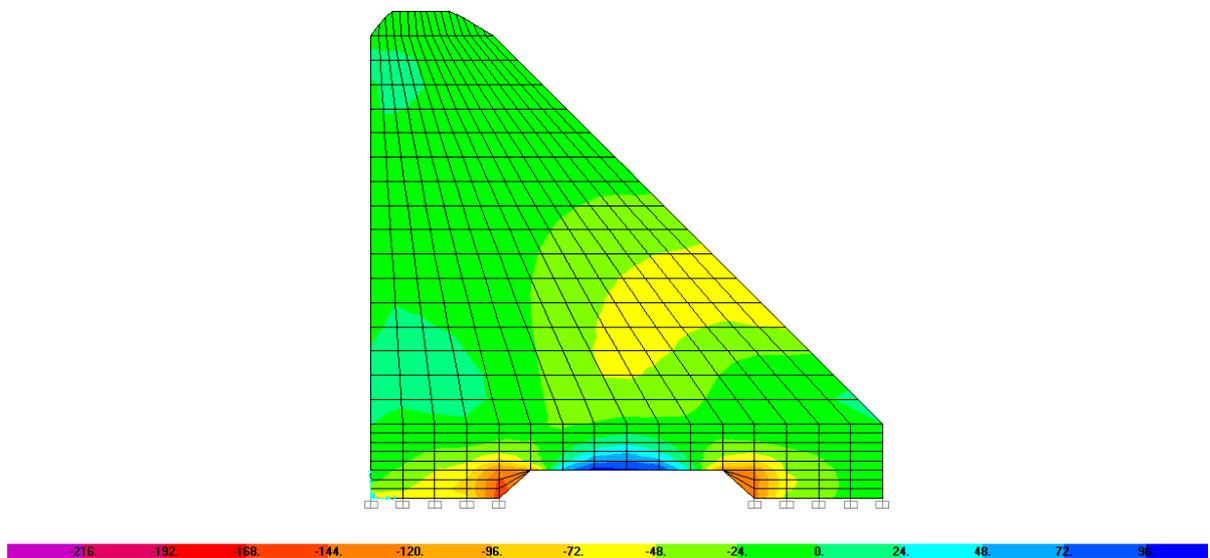


Figura 6 – Comportamento da estrutura devido ao peso próprio da estrutura

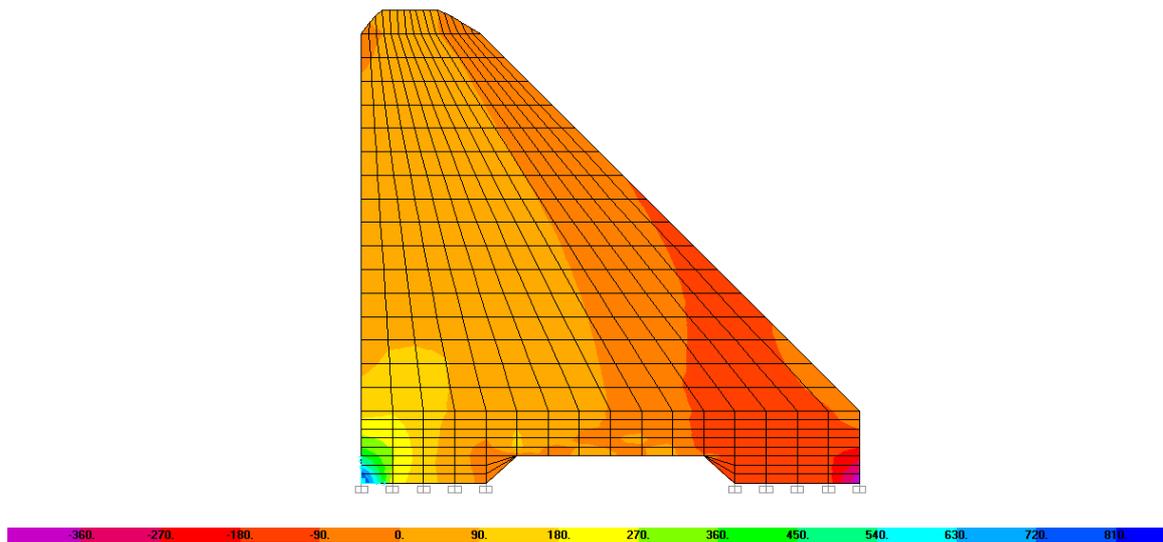


Figura 7 – Comportamento da estrutura devido à pressão da água à montante

2.1.1 Caracterização dos materiais

O módulo de elasticidade foi estimado seguindo critérios estabelecidos pela NBR 6118 (ABNT 2003). Essa norma estabelece a possibilidade de estimar o valor do módulo de elasticidade, quando não forem feitos ensaios e não existirem dados mais precisos sobre o concreto usado na idade de 28 dias, através da equação 1:

$$E = 5600 \cdot (f_{ck})^{\frac{2}{3}} \quad (\text{Equação 1})$$

$$E = 5600 \cdot (21)^{1/2} = 25662,42 \text{ MPa} \cong 25,6 \text{ GPa}$$

Onde:

E é o módulo de elasticidade do concreto em MPa,
fck é a Resistência característica do concreto em MPa.

Outras características do concreto utilizadas são:

- Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,2$;
- Densidade do concreto: $\gamma_c = 2.500 \text{ kg/m}^3$;
- A aceleração da gravidade considerada foi de $9,8 \text{ m/s}^2$.

De posse da geometria da seção definida, das características dos materiais utilizados no modelo, passou-se para a definição dos carregamentos e condições de contorno ou restrições nodais.

2.2 CARGAS ATUANTES

O cálculo da força de pressão ou empuxo que os fluidos em repouso exercem sobre as superfícies sólidas que os limitam, é efetuado com base nos princípios da hidrostática e encontra

aplicação em inúmeros problemas de engenharia, como nos projetos de barragens, comportas, reservatórios, etc.

No caso das Barragens, as forças atuantes são: empuxos horizontais - exercidos pelo nível de água de montante e jusante, empuxos verticais - exercidos pela subpressão de água, sobrepressão de água a montante e jusante e peso próprio da estrutura, e empuxos quaisquer exercidos por esforços externos. A Figura 8 mostra um exemplo de diagrama de esforços.

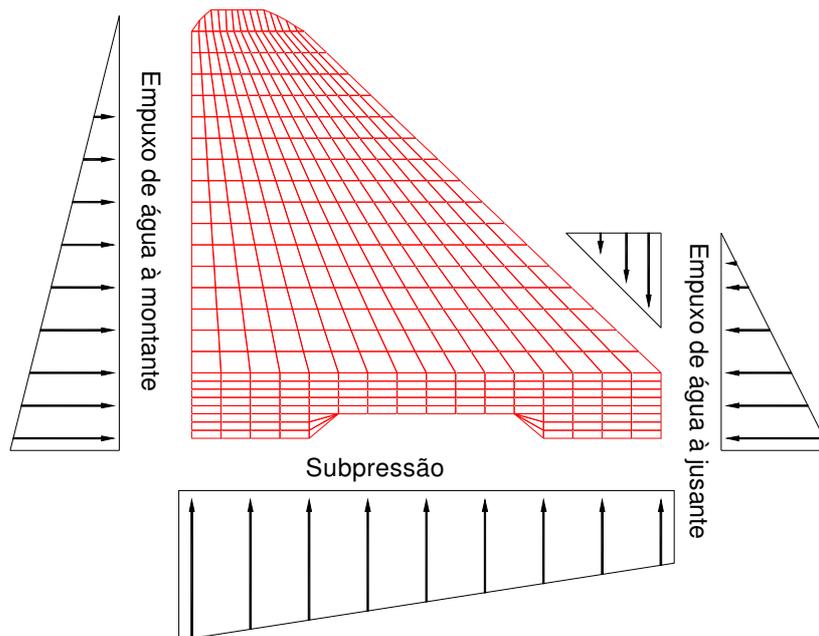


Figura 8 – Diagrama de esforços em uma barragem

Calcula-se a estabilidade da Barragem principalmente aos esforços de escorregamento, tombamento, pressões na base e cisalhamento. Mas deve-se verificar a estrutura também ao empuxo de sedimentos, sismos, gelo e ondas em casos especiais. A estabilidade quanto ao tombamento considera o somatório de todos os momentos atuantes em relação ao pé da barragem, adotando um coeficiente de segurança próximo a 2, conforme a equação 2.

$$\frac{\sum M_R}{\sum M_T} \geq 2 \quad \text{(Equação 2)}$$

M_R – Momento resistente

M_T – Momento tombador

Em relação ao escorregamento, a equação 3 calcula a força de atrito entre a barragem e o solo base e analisa-se em relação ao somatório das forças horizontais, adotando-se um coeficiente de segurança em geral, próximo a 1,5.

$$\frac{F_{AT}}{\sum F_H} \geq 1,5 \quad \text{(Equação 3)}$$

F_{AT} – Força de atrito

F_H – Forças horizontais

Para o cálculo das pressões na base, analisa-se a resultante de todas as forças que agem sobre a estrutura em relação ao seu núcleo central de inércia, e calcula-se as tensões máximas que a barragem exerce sobre o solo base. Compara-se então estas tensões com as tensões admissíveis deste solo, conforme a equação 4.

$$\sigma_{adm} \geq \sigma_{máx} \quad \text{(Equação 4)}$$

σ_{adm} – Tensão admissível do solo

$\sigma_{m\acute{a}x}$ – Tensão máxima atuante no solo

No cálculo do cisalhamento, verifica-se o somatório das forças horizontais em relação à resistência do concreto. Geralmente adota-se um coeficiente de segurança superior a 4, verificada na equação 5.

$$\frac{\tau_R}{\tau_{Cis}} \geq 4 \quad (\text{Equação 5})$$

τ_R – Tensão resistente

τ_{Cis} – Tensão cisalhante

Os cálculos quanto a sismos, ondas, empuxo de sedimentos e gelo nem sempre se aplicam, e quando necessários, requerem cálculos avançados e especializados. Características em relação à densidade da água são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Peso específico da água

água doce	< 1000 kg/m ³
água salobra	– 1000 a 1017 kg/m ³
água salgada	– 1017 a 1027 kg/m ³
água hipersalina	> 1027 kg/m ³

3 RESULTADOS

A construção da laje concomitantemente ao maciço de enrocamento não afeta o seu comportamento, ou seja, não gera movimentos excessivos na laje, desde que a mesma seja construída defasada do maciço. A distribuição de tensões na face de montante mostra que os valores máximos ocorrem aproximadamente a 1/3 da altura da barragem no centro do vale. Consideram-se algumas hipóteses para análise dos resultados:

- O concreto utilizado na barragem é um material homogêneo, isotrópico e uniformemente elástico;
- Todas as cargas apresentadas são transferidas à fundação pela “ação de viga”, ou seja, a barragem é analisada em um corte de largura unitária, sem restrição lateral.
- As tensões normais em planos horizontais variam linearmente da face de montante à face de jusante;
- As tensões de cisalhamento em planos horizontais variam parabolicamente da face de montante à face de jusante.

3.1 TENSÕES

As tensões máximas se localizam a montante da seção em pontos indicados na figura abaixo, variando entre -0,099 MPa (mínimo) e 0,044 MPa (máximo), Figura 9.

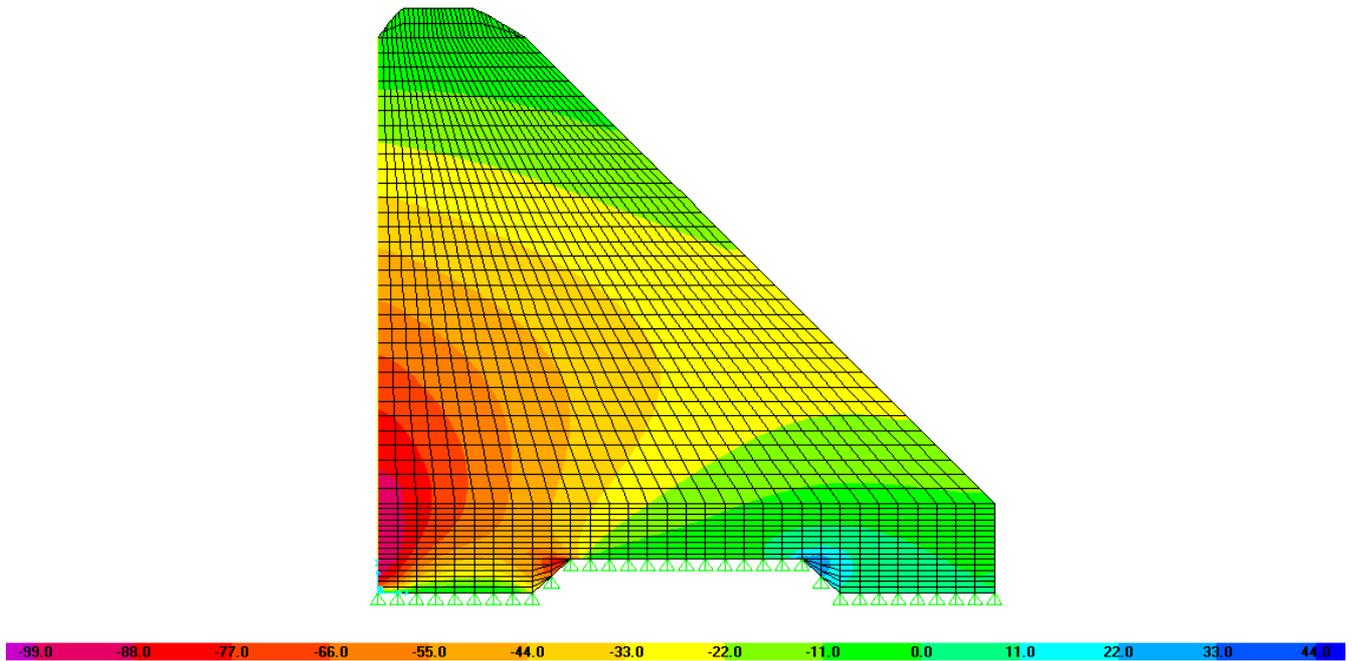


Figura 9 – Diagrama de tensões normais ao plano Vertical (MPa*10-3)

Verifica-se que as tensões máximas se encontram na base da barragem, e que variam entre -0,031 MPa (mínimo) e 0,014 MPa (máximo), conforme indicado na Figura 10 . Como era de se esperar, a distribuição de tensões mostra que a barragem está submetida a esforços de compressão, excetuando uma pequena concentração na parte inferior a montante.

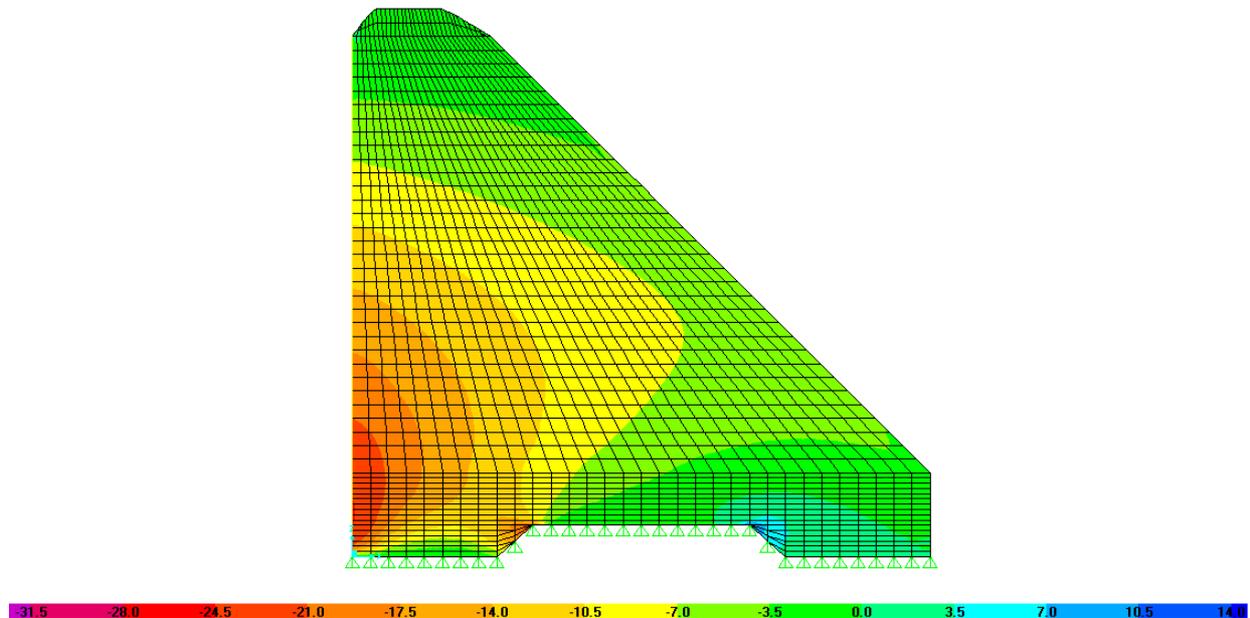


Figura 10 – Diagrama de tensões normais ao plano Horizontal (MPa*10-3)

A tensão máxima se localiza na base da seção da barragem mais exatamente no extremo montante, e a mínima a média altura, variando entre -0,014 MPa (mínima) e 0,0168 MPa (máxima), conforme a Figura 11. A deformada da estrutura é ilustrada na Figura 12.

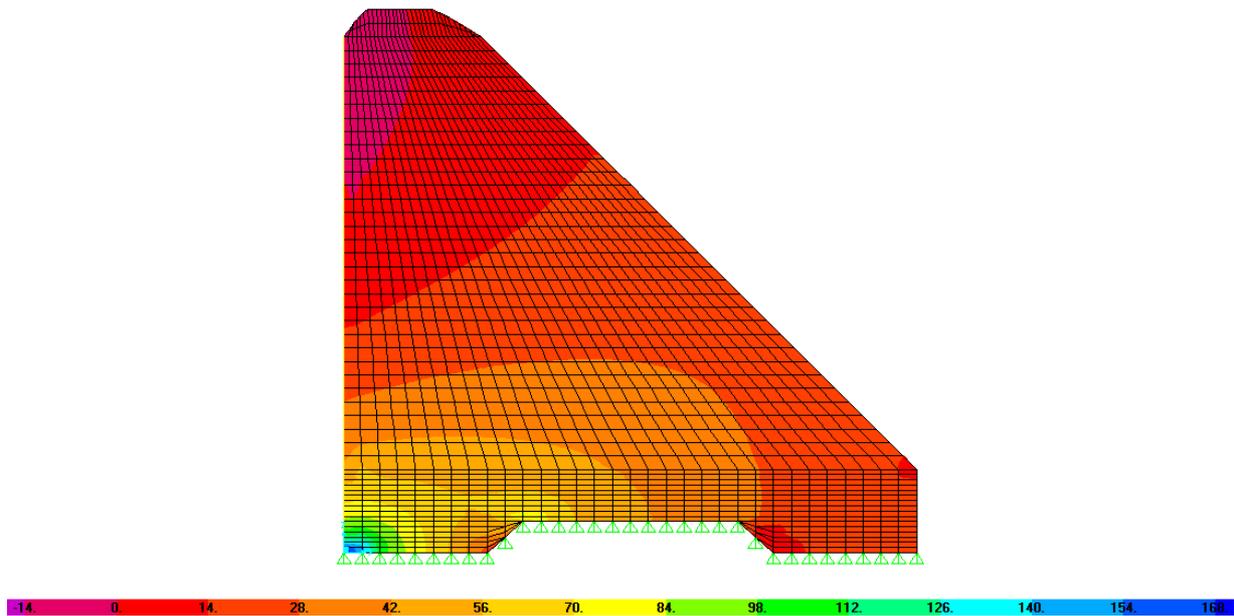


Figura 11 – Diagrama de tensões cisalhantes (MPa*10-3)

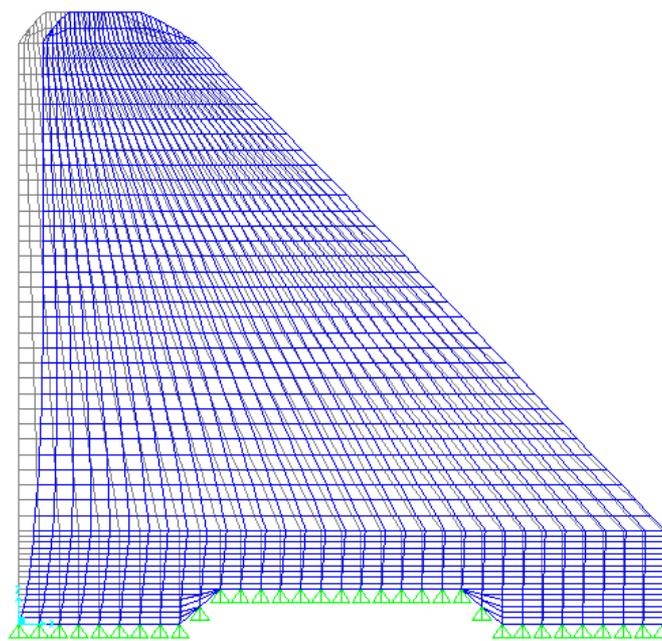


Figura 12 – Deformada da estrutura

4 CONCLUSÃO

Este trabalho propôs métodos para o comportamento estrutural da barragem de enrocamento e dimensionamento estrutural da mesma. Portanto, apresentam-se como mais um avanço no sentido de proporcionar projetos com fundamentos técnicos mais elaborados.

Concluí-se que para a seção utilizada, a cerca de 8 m da base, onde as restrições aos deslocamentos e conseqüentes deformações alteram de forma relevante o comportamento do campo

de tensões, as tensões analisadas foram praticamente as mesmas, no caso das tensões cisalhantes, e com pouca divergência, no caso das tensões normais.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ, CAPES, ITEGAM e FAPESPA pelo apoio financeiro a esta e outras pesquisas desta natureza realizadas na Região Norte do Brasil.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projetos de Estrutura de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ALBUQUERQUE JUNIOR, F. S.. **Análise de barragens de enrocamento com face de concreto durante o período de construção e enchimento**. Tese de doutorado, PUC-Rio, Departamento de Engenharia Civil, 1993.

CHUQUIMUNI, R.A.A., **Análise Numérica do Alçamento de Barragens de Terra**. Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CRUZ, P. T. 100 **Barragens Brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo, Editora Oficina de Textos, 1996.

PACHECO, D., ROVERE, L., LORIGGIO, D.D., WATZKO, A. & STRAMANDINOLI, J.S.B. **Modelagem de Barragens de Enrocamento com Face de Concreto**. V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, São Paulo, 2003.

MORI, R.T. **Deformações e Trincas em Barragens de Enrocamento com Face de Concreto**. II Simpósio de Barragens de Enrocamento com Face de concreto, CBDB, Florianópolis, Santa Catarina, 1999.

SCANDIUZZI, L., OLIVAN. L.I. **Uso de Concreto Compactado com Rolo – CCR, na Construção de Barragens**. Apostila, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2007.