

Comportamento da BEFC de Chaglla

Paola Dutra

Intertechne Consultores S.A., Curitiba, Brasil, paoola.dutra@hotmail.com

Alex Martins Calcina

Intertechne Consultores S.A., Curitiba, Brasil, amc@intertechne.com.br

Marcela Wamzer Jeiss

Intertechne Consultores S.A., Curitiba, Brasil, marcelawj@yahoo.com.br

Carlos Lucio Pinto

Odebrecht Infraestrutura, São Paulo, Brasil, lucio@odebrecht.com

RESUMO: A Usina Hidrelétrica de Chaglla, localizada no Peru, com potência instalada de 450 MW, possui uma barragem de enrocamento com face de concreto de aproximadamente 211 m de altura e volume de 8.400.000 m³. A BEFC de Chaglla está inserida no vale do rio Huallaga, de formação calcária, caracterizado por ombreiras íngremes de inclinação média de aproximadamente 70° na margem direita e 50° na margem esquerda, que resultaram em um baixo fator de forma do vale, aproximadamente de 1,50, o qual condicionou as soluções adotadas para o projeto, requerendo cuidados especiais durante a execução da barragem. Este trabalho apresenta uma previsão do comportamento da barragem com base em estudos de tensão e deformação tridimensionais, e a comparação dos resultados obtidos com os valores das primeiras leituras de instrumentação, após o enchimento do reservatório. Através da instrumentação instalada no corpo do aterro e na face de concreto, foi possível aferir se os critérios adotados em projeto estão coerentes com o comportamento de campo, considerando índices como módulos de deformabilidade dos materiais e desenvolvimento das deformações. Os resultados obtidos indicaram que as medidas construtivas e premissas adotadas em projeto estão mostrando, até o momento (janeiro/2016), comportamento dentro do esperado.

PALAVRAS-CHAVE: Barragem de enrocamento com face de concreto, instrumentação, módulo de deformabilidade, tensão e deformação.

1 INTRODUÇÃO

A construção da Usina Hidrelétrica de Chaglla foi iniciada em abril de 2011, sendo o enchimento de seu reservatório iniciado em setembro de 2015. Este empreendimento tem grande importância no parque gerador peruano, uma vez que representa cerca de 10% da geração da energia elétrica produzida pelo país. Na região desta obra o maciço rochoso predominante pertence ao grupo Pucará, constituído predominantemente por rochas calcárias. Foram encontrados também diferentes

tipos de depósitos recentes (aluvionares e coluvionares) geralmente em encostas superficiais de vales, depressões e planícies.

O arranjo geral da obra foi concebido com uma barragem de 211 m de altura, com vertedouro constituído por três túneis – seção arco-retângulo com 14,75 m de altura e 13,10 m de largura, comprimento médio de 762,2 m -, túnel de adução – seção arco-ferradura com 7,85 m de altura e 6,67 de largura, comprimento de 14,4 km -, túnel da PCH – seção arco-retângulo com 3,70 m de altura e 3,40 m de largura, comprimento de 441,6 m. O desvio do rio foi

concebido através de um túnel em seção arco-retângulo com 12,50 m de altura e 12,50 m de largura, comprimento de 1,1 km.

Os túneis estão localizados na margem esquerda da barragem, sendo que os do Vertedouro, da PCH e de Adução trabalham pressurizados, o que fez com que esta margem esquerda recebesse um sistema de drenagem composto por DHPs e túneis de drenagem.

rolos vibratórios pesados (26 toneladas) e molhagem durante o processo de compactação, cerca de 150 a 200 l/m³.

Através dos resultados obtidos nas simulações do modelo tridimensional de tensão e deformação, comparados com as leituras de instrumentação, foi possível verificar se a barragem apresenta um comportamento adequado, tendo como premissa os critérios

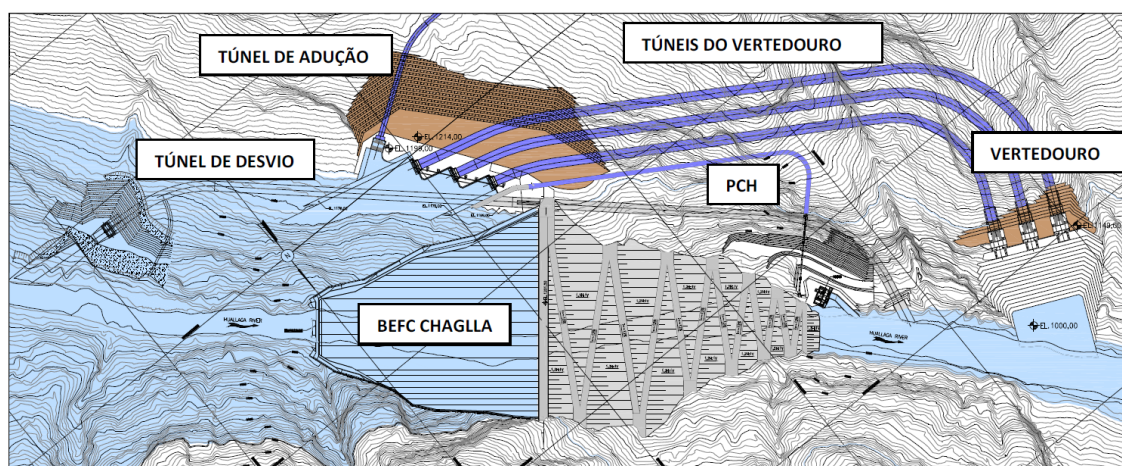


Figura 1 – Planta – Arranjo Geral

A barragem foi fundada em um vale com ombreiras íngremes em formato geométrico assimétrico, fazendo com que na margem direita, onde a inclinação média houvesse a necessidade de ser projetada em cerca de 50% do comprimento, uma solução de plinto com geometria vertical, conforme adotado também nas barragens de Paute Mazar (Equador) e Ancoa (Chile). Como critério de projeto foi definido que o plinto estivesse situado em maciços rochosos classe II e III, segundo classificação RMR de Bieniawski.

Observando o módulo de deformabilidade do aterro e a altura da barragem, através do gráfico proposto por Pinto et al (2007), Chaglla possui um fator de forma – A/H^2 , sendo A=área da face de concreto e H=altura da barragem – de cerca de 1,5, que situa a barragem numa região do gráfico que requer maiores cuidados para se garantir uma performance adequada. Além da altura e pelo fato de estar localizado em um vale fechado com ombreiras íngremes, foi necessário se adotar para o projeto o uso de materiais granulares mal graduados para a construção do aterro ($CNU \geq 40$), espessura reduzida de camadas de materiais ($e=0,60m$), emprego de

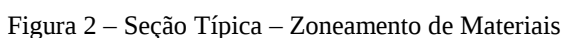
adotados em projeto.

2 ESTUDOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

Através do modelo tridimensional de tensão e deformação efetuado com o software MIDAS GTS NX, utilizando-se do MEF (Método dos Elementos Finitos), foi possível avaliar a tendência de comportamento da barragem de enrocamento com face de concreto de Chaglla. Foi empregado como critério de análise um processo de cálculo evolutivo, o qual simula a construção do aterro em camadas, acompanhando a sequência construtiva do aterro definida pelo construtor. Neste modelo foram utilizadas cinco etapas de carregamento construtivo e uma etapa final simulando a fase de carregamento do reservatório.

O zoneamento dos materiais da barragem foi pensado de maneira que o aterro se tornasse uma estrutura pouco deformável, compatível com a morfologia do local. Os módulos de deformabilidade dos materiais foram extraídos de ensaios de prova de carga de placa, bibliografia técnica e da experiência da

entre as lajes, visando conviver com a tendência de comportamento esperado em análises tridimensionais.



Zona	Material	Diâmetro Máximo (cm)
1A	Silte – Material colmatante	0,1
1B	Random	20,0
2B	Transição única	10,0
3B	Enrocamento de rocha sã	50,0
3C	Enrocamento de rocha sã	70,0
F	Filtro	20,0
4	Blocos de rocha sã arrumados na face de jusante da barragem	120,0
T	Material de rocha medianamente ou pouco alterada	35,0

Os maiores esforços de tração mostrados na Figura 3 são expressos na cor vermelha, verificados na margem direita, compatível com a elevada inclinação desta margem (70°). Em razão disso foi necessária a aplicação de um material com elevado módulo de deformabilidade, denominado como 3B' (cascalho aluvionar compactado), para evitar deformações excessivas nessa região que pudesse comprometer a integridade das lajes e dos vedajuntas.

Os efeitos do carregamento do reservatório podem ser vistos na Figura 3 e também observando uma seção transversal pelo eixo da barragem (montante- jusante), Figura 4.

Os maiores recalques apresentados pelas análises foram verificados próximos da face de concreto da barragem – cor azul na Figura 4 -, esforços que são resultado da força de empuxo hidrostático do reservatório.

O modelo tridimensional faz a consideração do maciço de fundação do plinto e do leito do rio como indeformável, consideração que esta de acordo com elevados módulos de deformabilidade desses materiais. A adoção deste critério justifica os reduzidos recalques apresentados pela análise de tensão-deformação na fundação da barragem – cor vermelha da Figura 4.



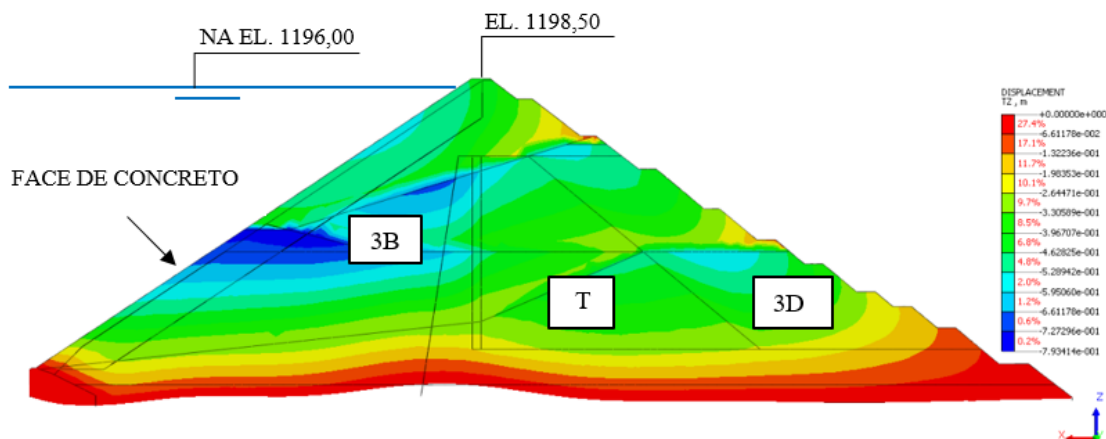


Figura 4 - Seção Transversal – Deslocamento Vertical (Z)

3 INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação foi utilizada como ferramenta de aferição dos critérios adotados em projeto e como parâmetro de comparação com os estudos de tensão e deformação realizados em modelo 3D, além do acompanhamento da segurança da barragem. Na construção desta barragem, a instrumentação teve um papel importante no monitoramento do comportamento dos

durante todo o período construtivo do aterro, permitindo calibrar o pari-passu o modelo de tensão e deformação com a construção, se baseando nos módulos de deformabilidade obtidos pela instrumentação. As Figuras 5 e 6 apresentam uma comparação entre os recalques apresentados em modelo 3D e as leituras da instrumentação, após o enchimento do reservatório, das caixas suecas e placas de recalque magnéticas respectivamente.

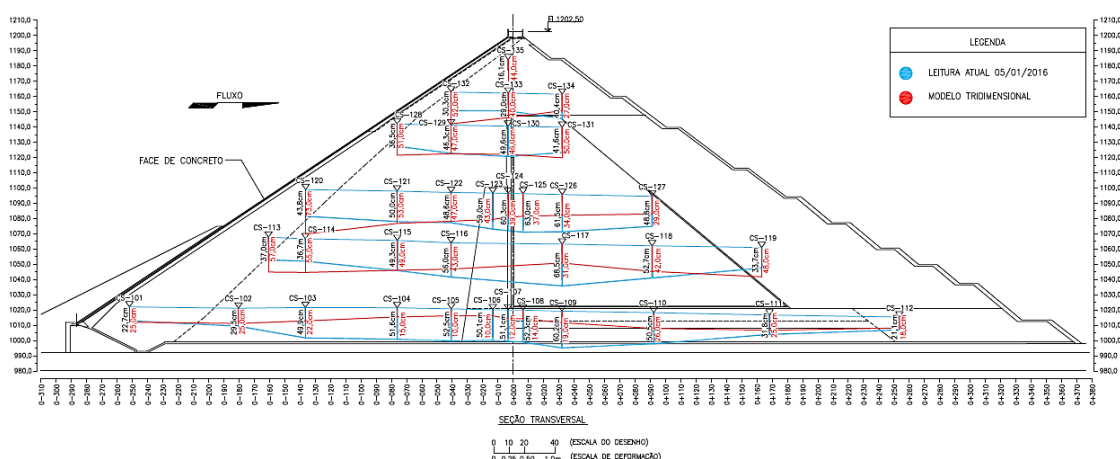


Figura 5 – Comparação entre Recalques do Modelo Tridimensional e Leituras das Caixas Suecas

materiais do aterro, tornando possível alguns ajustes durante o processo construtivo, podendo-se citar como principais efeitos a disposição de materiais em zonas específicas da barragem e ajuste de espessura de camada. Para a verificação de recalques foram utilizadas caixas hidráulicas de assentamento (caixas suecas) e placas de recalque magnéticas instaladas dentro do corpo do aterro. As leituras destes instrumentos foram acompanhadas

As leituras das caixas suecas apresentaram recalques consideráveis próximos da face de concreto e do eixo da barragem, sendo que as análises tridimensionais haviam evidenciado recalques importantes nessas regiões. Os maiores deslocamentos apresentados pelas placas magnéticas, fixadas no centro da barragem, ocorrem na meia altura do aterro, tendência de comportamento esperado para aterros de barragens de enrocamento. Os

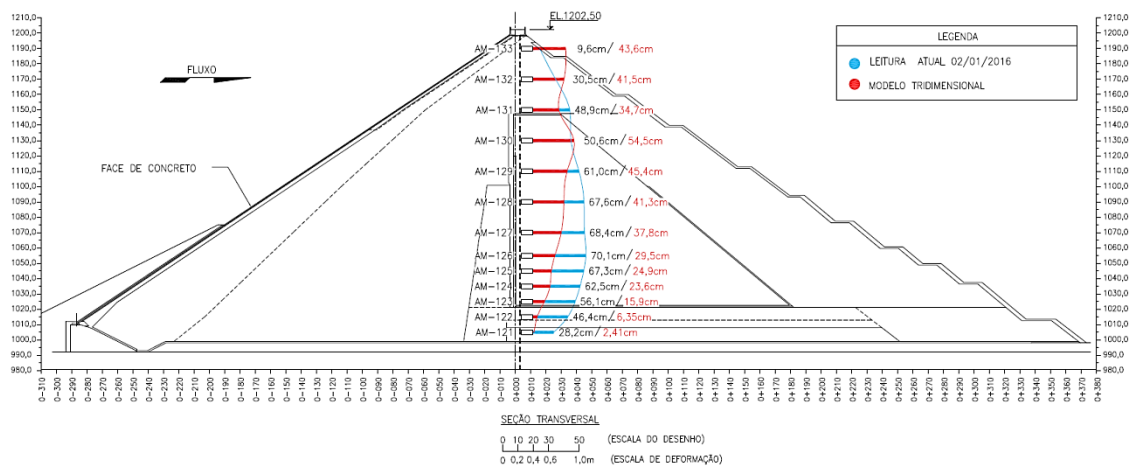


Figura 6 – Comparação entre Recalques do Modelo Tridimensional e Leituras das Placas Magnéticas

estudos de tensão e deformação evidenciaram este comportamento.

Com a finalização do processo de construção do aterro, foi possível obter, através das leituras das caixas suecas e placas de recalque magnéticas, o módulo de deformabilidade construtivo dos materiais 3B, 3C, 3B' e T. A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os módulos iniciais adotados no início do projeto e os módulos aferidos através da instrumentação.

Tabela 2 – Comparação de Módulos de Deformabilidade

Material	Módulo Deformabilidade de Projeto E (MPa)	Módulo Deformabilidade Instrumentação E (MPa)
3B	100	248
3C	100	95
T	60	231
3B'	180	245

Com o avanço da construção esses módulos foram sendo ajustados com o comportamento

obtido da instrumentação. Como não se dispunha de dados de campo, os módulos iniciais foram adotados com tendência mais conservadora.

A deformação da laje de concreto foi realizada através da decomposição dos recalques apresentados pelas caixas suecas próximas do reservatório, comparados aos resultados obtidos nos estudos de tensão e deformação, conforme pode ser observado na Figura 7.

As zonas de tração na laje de concreto foram aferidas através de extensômetros de junta. Estes instrumentos apresentaram tendência de comportamento similar àquele verificado pelo estudo tridimensional, com exceção de alguns medidores próximos a margem direita, os quais apresentaram esforços opostos daqueles previstos, porém com deformações insignificantes, inferiores a 1,0 mm. Este desempenho das lajes da margem direita significa que estas estruturas não estão apresentando abertura, estão se movimentando

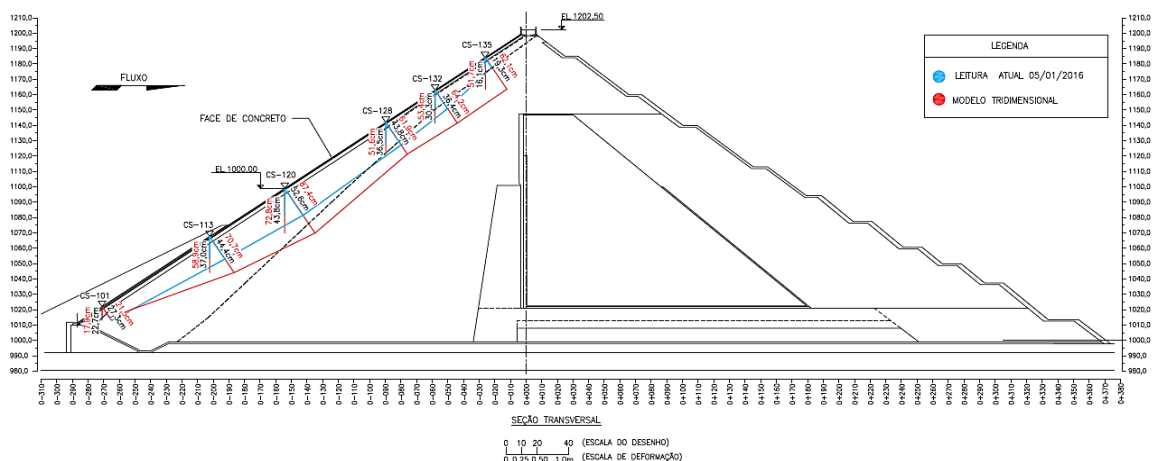


Figura 7 – Seção Transversal – Deformação da Face de Concreto

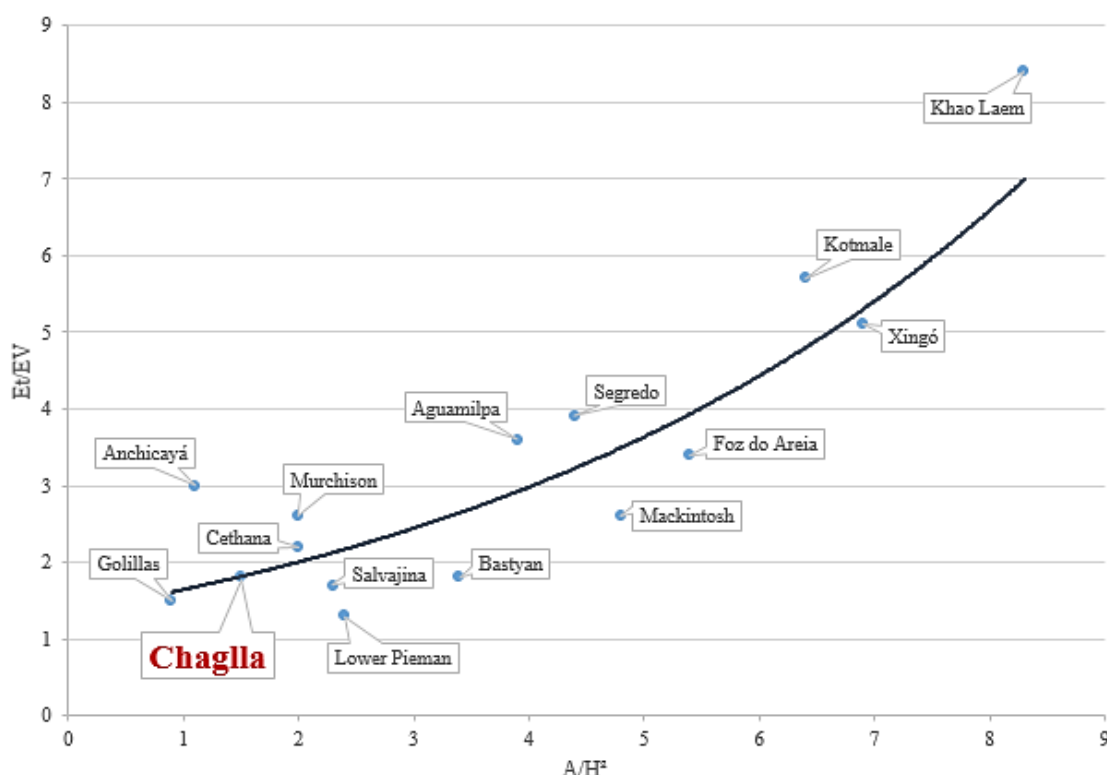


Figura 9 – Correlação entre a Relação dos Módulos E_t e E_v versus Fator de Forma (Pinto e Marques Filho, 1998)

As zonas de tração e compressão foram verificadas através de extensômetros unidirecionais e medidores de deformação respectivamente. Estes instrumentos evidenciaram um comportamento previsto em modelo.

5 CONCLUSÕES

As tendências de comportamento representadas pelos resultados obtidos através de simulações em modelo tridimensional de tensão-deformação foram confirmadas pelas leituras da instrumentação, de maneira geral. A barragem de enrocamento com face de concreto de Chaglla apresenta, até o momento (janeiro de 2016), comportamento dentro do esperado, com baixas deformações, apesar do formato fechado do vale e da morfologia do local (ombreira direita com inclinação média de 70°).

O modelo tridimensional de tensão e deformação foi de fundamental importância para analisar a tendência de comportamento da barragem, durante o processo construtivo e durante o enchimento do reservatório. Além disso, foi possível a observação da deformação

total na crista, recurso utilizado como parâmetro no projeto de sobre-elevação da crista da barragem.

Os módulos de deformabilidade vertical, previstos inicialmente em projeto, são menores aos obtidos com base nas leituras das caixas suecas e placas de recalque magnéticas.

Com o fator de forma do vale e informações obtidas através da instrumentação – módulo de deformabilidade transversal e vertical – foi possível confirmar a posição de Chaglla no gráfico de Pinto e Marques Filho (Figura 9), conforme previsto inicialmente em projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Intertechne Consultores S.A pelos dados disponibilizados, à EGH (Empresa de Generación Huallaga S.A.) e a OPIC (Odebrecht Perú Ingeniería y Construcción S.A.C.) por permitir e autorizar os dados que possibilitaram elaborar o presente artigo.

REFERÊNCIAS

- Cruz, P. T., et al. (2009) *Concrete Face Dams*, Oficina de Textos, São Paulo.
- Silveira, J. F. A. (2006) *Instrumentação e Segurança de Barragens de Terra e Enrocamento*, Oficina de Textos, São Paulo.
- Pinto, N. L. de S., et al. (1998) *Estimating the Maximum Face Deflection in CFRDs*, Hydropower & Dams.
- Pinto, N. L. de S. (2009) *The Design and Construction of Extra High CFRDs*, Hydropower & Dams.