



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID35608>



Análise numérica e estudo de tensão e deformação em comparação com leituras em caixas suecas instrumentadas em uma barragem de enrocamento com face de concreto localizada no Peru

Numerical analysis and study of stress and deformation in comparison to readings from instrumented swedish boxes in a concrete-faced rockfill dam located in Peru

Marcelo de Paula Barreto¹; Sidnei Helder Cardoso Teixeira²; Andres Miguel Gonzalez Acevedo³; Alex Martins Calcina⁴; Pedro de Carvalho Tha⁵; Paola Dutra⁶; Heber Augusto Cotarelli de Andrade⁷; Julio Cesar Lopes⁸; Soraia Bastos Katereniuk⁹

¹ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: mpbarretonline@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-1295-0497>

² Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: s.teixeira@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3522-1706>

³ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: andres.gonzalez@ufpr.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3749-2278>

⁴ Instituto de Ensino de Engenharia Paulista (IEEP), Departamento de Engenharia Civil, São Paulo/SP, Brasil. Email: amc@intertechne.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6537-2292>

⁵ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: pedro.tha@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0006-1274-1502>

⁶ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: paola_dutra@outlook.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4757-3899>

⁷ Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Rio de Janeiro/RJ, Brasil. Email: handrade@sanepar.com.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-3395-9847>

⁸ Universidade Tuiuti do Paraná (UTP), Departamento de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: juliolopes.jl34@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-9804-6223>

⁹ Universidade Federal do Paraná (UFPR), Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Curitiba/PR, Brasil. Email: eng.sbk@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-1019-3829>

Resumo: No campo da engenharia, as Barragens de Enrocamento com Face de Concreto (BEFC) têm se destacado como uma solução cada vez reconhecida, impulsionada por estudos e histórico de casos reais. A implementação bem-sucedida desse tipo de barragem se baseia em projetos empíricos, apoiados por dados de obras anteriores e acompanhamento de seu desempenho por meio de monitoramento. Um ponto de atenção é a presença de fissuras e trincas na laje de concreto que cobre o talude de montante, causadas pela movimentação e deformações do maciço da barragem. Além disso, a geometria do vale entre as ombreiras também desempenha um papel importante, impactando a redistribuição das cargas e gerando deformações no maciço. Este estudo tem como objetivo principal comparar, por meio de ferramentas computacionais e dados de campo, o comportamento de um material diferente aplicado na barragem.

Palavras-chave: Barragem de enrocamento com face de concreto; Instrumentação; Tensão e deformação.

Abstract: In the field of engineering, Concrete-Faced Rockfill Dams (CFRDs) have been recognized as an increasingly prominent solution, driven by studies and a history of real-world cases. The successful implementation of this type of dam is based on empirical designs, supported by data from previous projects, and monitoring its performance through surveillance. A point of attention is the presence of fissures and cracks in the concrete slab covering the upstream slope, caused by the movement and deformations of the dam's mass. Additionally, the valley geometry between the abutments also plays a crucial role, impacting the redistribution of loads and generating deformations in the mass. This study aims primarily to compare, through computational tools and field data, the behavior of a different material applied in the dam.

Keywords: Rockfill dam with concrete facing; Instrumentation; Stress and deformation.

Recebido: 16/03/2023; Aceito: 28/05/2024; Publicado: 18/06/2024

1. Introdução

A construção de barragens com a finalidade de represar água para consumo, irrigação e geração de energia possui raízes antigas em diversas culturas. Com o passar dos anos, houve um aumento tanto em quantidade quanto em altura dessas estruturas (CRUZ, 1996), resultando em vantagens múltiplas, como proteção contra inundações, suprimento de água, enfrentamento de secas, irrigação, navegação, gerenciamento de resíduos e produção de energia elétrica. O avanço tecnológico, incluindo métodos numéricos e computacionais, estabeleceu uma base científica que garante a segurança na concepção, construção e operação de barragens. O tipo de barragem é determinado pelas condições do local, materiais disponíveis e processo de construção, sendo as barragens homogêneas de terra e as mistas de terra e enrocamento as mais comuns, devido à topografia e disponibilidade de materiais, sendo projetadas com fundações versáteis para solos resistentes.

Ao planejar uma barragem, é essencial considerar diversos aspectos, como custos, materiais disponíveis, acessibilidade e impacto ambiental, o que influencia na escolha do tipo de barragem mais adequado. A barragem de enrocamento com face de concreto (BEFC) é uma opção frequentemente estudada e crescentemente adotada globalmente, especialmente em locais com vales estreitos, devido ao equilíbrio entre custo e segurança.

O projeto desse tipo de barragem leva em consideração diversos fatores, incluindo a disponibilidade de material adequado para o enrocamento em blocos de rocha com a granulometria correta e a composição dos materiais para a laje de concreto da face da barragem. A laje de concreto não apenas contribui para a estabilidade global, mas também desempenha um papel crucial na vedação da barragem.

O projeto dessa barragem é embasado em critérios empíricos, modelos matemáticos utilizando métodos finitos, modelos hidráulicos reduzidos e experiência de projetos anteriores. A segurança é a principal prioridade nesse tipo de construção, guiando desde o desenvolvimento de projetos de viabilidade até os projetos executivos, assegurando a construção apropriada. Vale ressaltar que o rompimento de qualquer barragem pode ter impactos devastadores no meio ambiente e na sociedade, levando a perdas irreparáveis em termos sociais e econômicos.

A abordagem da barragem de enrocamento com face de concreto, que combina materiais rochosos com uma camada de concreto, oferece várias vantagens em relação a alternativas mais tradicionais, como barragens de terra com núcleo de argila compactada e barragens de rejeitos de mineração. A metodologia construtiva dessa barragem se destaca por sua agilidade e rapidez. A ausência de poropressão no maciço é uma vantagem adicional. A estabilidade natural da estrutura e o tratamento simples das fundações, incluindo a injeção pelo plinto, permitem maiores alturas, aumentando a capacidade de retenção.

A combinação dessas vantagens reflete o aumento na construção desse tipo de barragem. A busca por construção segura e econômica é o objetivo primordial para qualquer empreendedor. Uma preocupação significativa em relação a esse tipo de barragem é a laje de concreto de vedação a montante. Problemas de trincas nessa laje afetam a impermeabilidade da barragem. O surgimento de trincas geralmente é causado pela incompatibilidade entre o enrocamento dentro do maciço e a laje de concreto. Presença de camadas de solo ou rocha alterada na fundação pode também comprometer a interação entre a laje e o maciço, levando a movimentos desfavoráveis e trincas.

A complexidade da análise do enrocamento decorre da simulação da compactação, incluindo a replicação do aterro em camadas, uso de rolo compactador, considerações de umidade, mineralogia do material e comportamento dos grãos durante a construção. O dimensionamento de obras de enrocamento frequentemente se baseia em parâmetros geotécnicos empíricos, com apoio de referências bibliográficas e estudos de obras anteriores, além de monitoramento contínuo dos instrumentos geotécnicos durante a construção, permitindo a calibração desses parâmetros com base em resultados obtidos.

No estudo de Penman e Rocha Filho (2000), é apresentada a evolução dos deslocamentos ao longo da superfície de concreto da barragem de Xingó ao longo de aproximadamente seis anos. Esse processo de evolução está relacionado principalmente ao rearranjo das partículas no concreto, conforme visualizado na FIGURA 1. Notavelmente, os valores dos deslocamentos aumentaram quase que de forma dobrada durante esse período. Essas mudanças nos deslocamentos são atribuídas, em parte, à interação da infiltração de água devido à presença de trincas na laje da barragem.

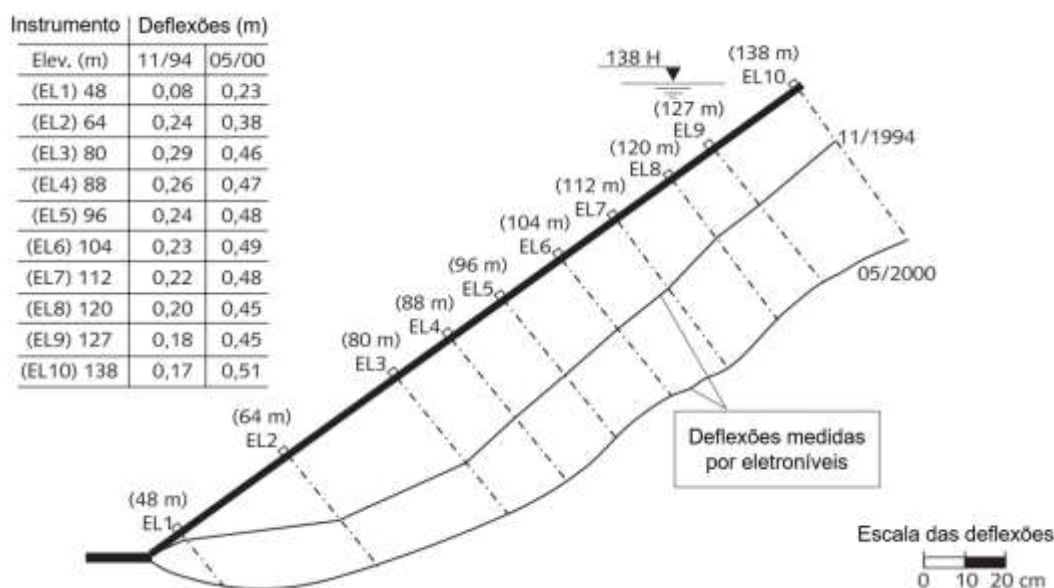


Figura 1 – Deformações na Face de Concreto Da Barragem de Xingô (Cruz, 2014).

Fonte: Cruz (2014).

A Barragem de Enrocamento com Face de Concreto de Chaglla, integrante do complexo de Aproveitamento Hidroelétrico de Chaglla, no Peru, é notável pela capacidade instalada de 450 MW e altura de 212 metros, possuindo um volume total de 8.400.000 m³. A viabilização desse projeto foi baseada em fatores práticos, como o formato do vale, o uso de veda-juntas especiais e a incorporação de materiais não convencionais. A construção da barragem ocorreu entre 2011 e 2015.

O foco reside na análise do comportamento da Barragem de Chaglla, utilizando instrumentação e simulações tridimensionais de tensão e deformação estática. Essa análise busca substituir o enrocamento convencional pelo cascalho, material de alta deformabilidade. A estratégia é respaldada por experiências globais semelhantes, em que profissionais e especialistas utilizam referências de projetos passados para o dimensionamento e projeto de Barragens de Enrocamento com Face de Concreto. A segurança da barragem é avaliada através de monitoramento com diferentes tipos de instrumentos geotécnicos, enquanto a viabilidade econômica é influenciada pela disponibilidade de materiais adequados (FERNANDES, 2007).

A barragem desempenha um papel importante na contenção da água, com projeto que considera o galgamento. A técnica de construção de barragens de enrocamento teve início nos EUA entre 1850 e 1870, expandindo-se globalmente desde então. Durante a construção, a instrumentação monitora movimentos globais do enrocamento, tanto interna quanto externamente.

Para prever o comportamento da Barragem de Chaglla, a análise de tensão e deformação tridimensional é utilizada, comparando resultados com as leituras iniciais de instrumentação. Também é feita a simulação com o uso de cascalho, material não processado. Através do software MIDAS GTS NX e do Método dos Elementos Finitos (MEF), uma análise abrangente é realizada, apresentando resultados de tensão e deformação. Três pontos próximos à instrumentação são minuciosamente analisados para referência comparativa (CRUZ, 2014).

2. Metodologia

O complexo hidrelétrico de Chaglla está situado no rio Huallaga, na vertente oriental dos Andes, direcionado para a Floresta Amazônica. Sua localização oferece desafios geotécnicos devido às características do terreno, como maciço rochoso de rochas calcárias e terreno acidentado com vales profundos e encostas íngremes. A geologia complexa da região, incluindo falhas e a suscetibilidade a fenômenos de dissolução das rochas calcárias, tornou as investigações e a implantação do projeto desafiadoras (JEISS, 2015).

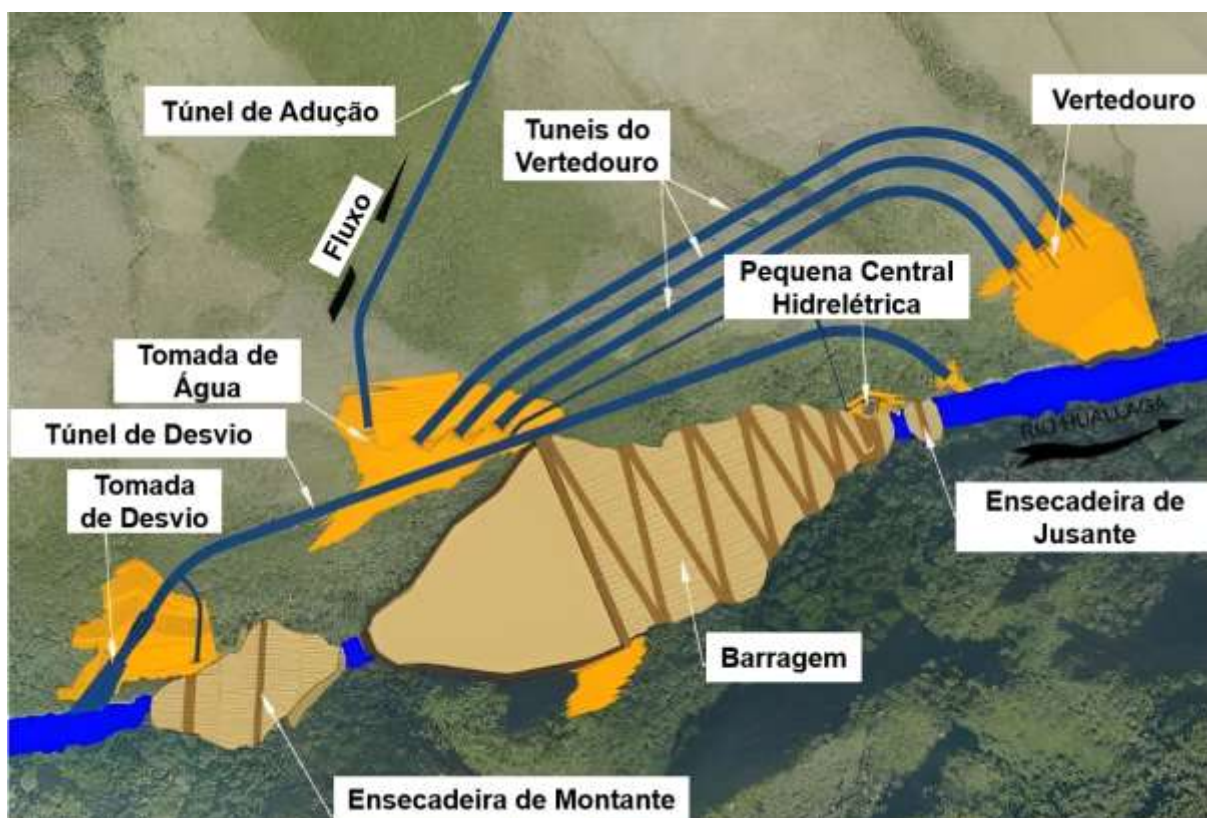


Figura 2 – Arranjo Geral do Empreendimento de Chaglla
Fonte: Intertechne (2015).

O complexo hidrelétrico de Chaglla abrange várias estruturas significativas. O túnel de adução, com 14,4 km de comprimento, representou a maior parte das escavações subterrâneas e foi construído utilizando o método Drill And Blast. O vertedouro foi projetado para lidar com cheias máximas de aproximadamente 5600 m³/s e possui três túneis pressurizados com comportas radiais. A casa de força a céu aberto abriga duas turbinas do tipo Francis. A barragem em estudo é do tipo enrocamento com face de concreto, com 212 m de altura e cerca de 8.400.000 m³ de volume, situada no vale do Rio Huallaga. A PCH adjacente possui uma potência instalada de 6 MW e seus túneis de adução estão próximos ao vertedouro. Os principais dados do projeto incluem uma potência de 450 MW, localização no Rio Huallaga, Peru, período de construção de 2012 a 2017, altura máxima da barragem principal de 212 m e capacidade de descarga do vertedouro de 6.530 m³/s (INTERTECHNE, 2017).

Quando dispostas as características do vale e módulo de deformabilidade do aterro de enrocamento previsto no gráfico proposto por Pinto (2007), exposto na FIGURA 2, cujo fator de forma A/H^2 , onde (A) representa a área da face de concreto e (H) representa a altura da barragem, este fator é bastante baixo, cerca de 1,50 representado em vermelho, com isso é possível observar que Chaglla fica posicionada numa zona do gráfico em que se requerem cuidados especiais para o projeto e execução da barragem, tendo a linha azul como um divisor entre barragens que apresentaram melhor desempenho das que mostraram algum tipo de incidente durante a operação. A área (A) da face de concreto da Barragem de Chaglla tem 59.000,00 m².

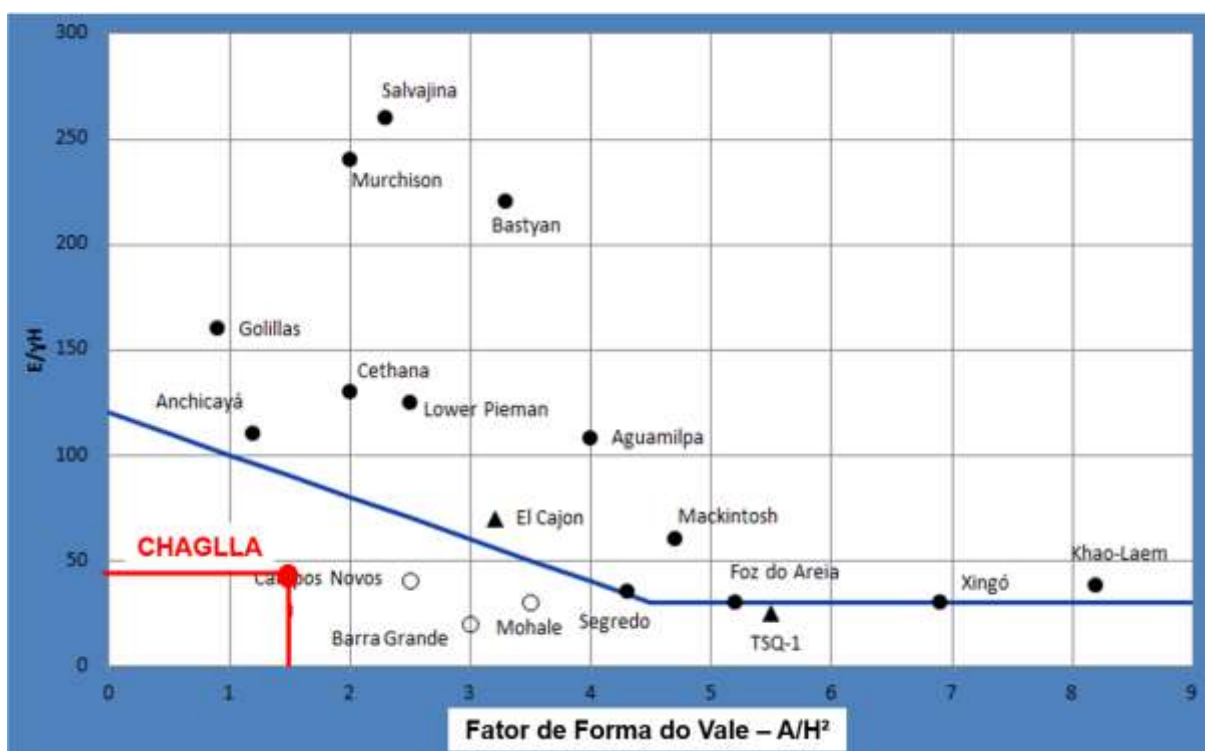


Figura 3 - Relação do Fator A/H^2 (Forma Do Vale)
 Fonte: Pinto & Marques (2007).

3. Instrumentação (Caixas Suecas)

Caixas suecas ou células hidráulicas são dispositivos compostos por blocos de concreto, tubos flexíveis e tubos de aço interligados, usados para medir recalques em aterros durante a construção e operação do reservatório (SILVEIRA, 2006). Geralmente instaladas horizontalmente dentro do enrocamento, essas células são interconectadas com uma cabine de instrumentação por tubos de ar, leitura e drenagem. Através de conexões hidráulicas que atravessam o enrocamento, os recalques diferenciais entre as zonas do enrocamento são considerados para evitar problemas de desempenho e colapso (CRUZ, 2014).

Outros instrumentos usados para medir deformações e recalques incluem extensômetros, células elétricas, medidores Km, torpedo USBR e anéis magnéticos, com inclinômetros sendo instalados em algumas situações (CRUZ, 2014). Para a barragem de Chaglla, os medidores de recalque e deformação incluem caixas suecas, inclinômetros com placas magnéticas e pontos topográficos (INTERTECHNE, 2016).

Estimativas de recalque mostraram-se mais realistas para prever recalques pós-construção, visto que modelar as complexidades e heterogeneidades dos enrocamentos em modelos matemáticos é desafiador (CRUZ, 2014). Na TABELA 1 abaixo são apresentados abaixo recalques (R) pós-construção e a sua relação com a altura (H) da barragem (INTERTECHNE, 2015).

A TABELA 1 mostra que os maiores deslocamentos estão ligados ao método de construção, se foi lançado ou compactado. A relação R/H (recalque/altura da barragem) não é exclusivamente determinada pelo método de construção, pois pode variar devido a outros fatores, como o material de base. A barragem de Chaglla tem enrocamento compactado e 200m de altura, com um recalque pós-construção de até 0,5% da altura (INTERTECHNE, 2015).

Tabela 1 – Recalques pós construtivos.

Obra	País	Altura (m)	Long. (m)	L/H	A/H ²	Recalque (m)	R/H (%)	Método Construtivo
Cogoti	Chile	85	160	1.88	2.21	1.08	1.27%	Lançado
New Exchequer	EE.UU	150	427	2.85	-	1.49	0.99%	Lançado + Compac.
Les Fades	França	68	235	46	3.57	0.158	0.23%	Compac.
Outardes 2	Canadá	55	350	6.36	-	0.007	0.01%	Compac.
Shiroro	Nigéria	125	560	4.48	-	0.065	0.05%	Compac.
Fortuna	Panamá	60	300	5.00	-	0.52	0.87%	Compac.

Fonte: Intertechne (2015).

Vários fatores podem afetar o comportamento mecânico dos enrocamentos, conforme Materon (1983; citado em Basso, 2007): mineralogia, granulometria, índice de vazios, formas das partículas, resistência ao fraturamento dos grãos, tamanho, textura, teor de água e velocidade de carregamento. A FIGURA 4 ilustra os principais fatores que influenciam o comportamento mecânico dos enrocamentos.

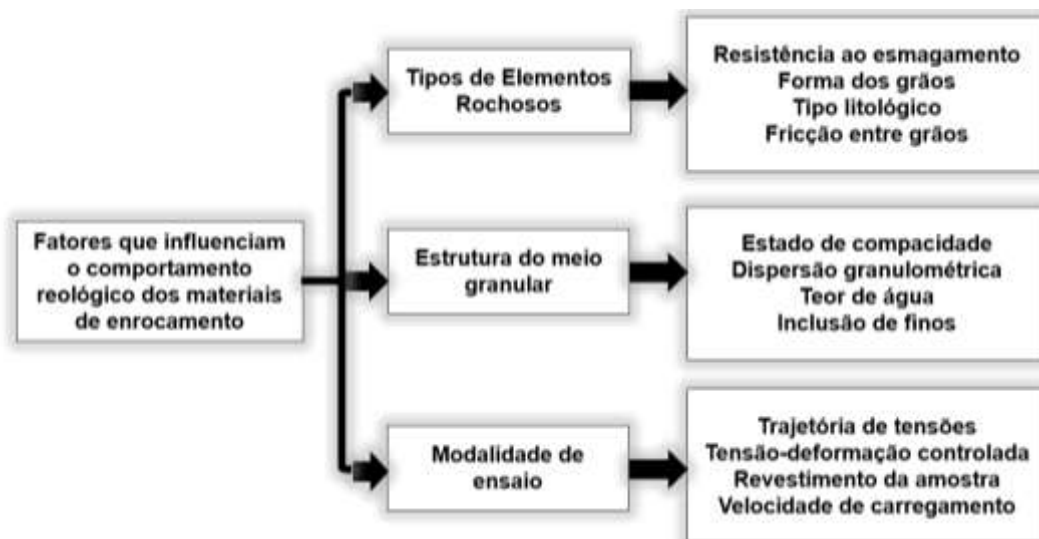


Figura 4 – Fatores de Comportamento dos Enrocamentos

Fonte: Silva (2007).

Na barragem de Chaglla, os valores de referência das caixas suecas foram determinados de forma adaptada, considerando o comportamento específico observado na construção e enchimento do reservatório. Esses valores levaram em conta a influência diferenciada do empuxo do reservatório, dependendo da localização e proximidade do instrumento em relação à face de concreto (INTERTECHNE, 2015).

Dado que o corpo da barragem contém materiais heterogêneos em diferentes zonas, por vezes até diferentes na mesma zona devido à origem de materiais de várias áreas de empréstimo, as análises dos recalques das células foram conduzidas em conjunto com os instrumentos anexados. Isso ocorreu sempre que as leituras ultrapassaram os valores de referência (INTERTECHNE, 2015).

A FIGURA 5 compara as leituras de 2016 com os valores de referência dos instrumentos. Esses valores foram estabelecidos com base em dados estatísticos de outras obras, buscando prever deslocamentos pós-construtivos de maneira mais realista.

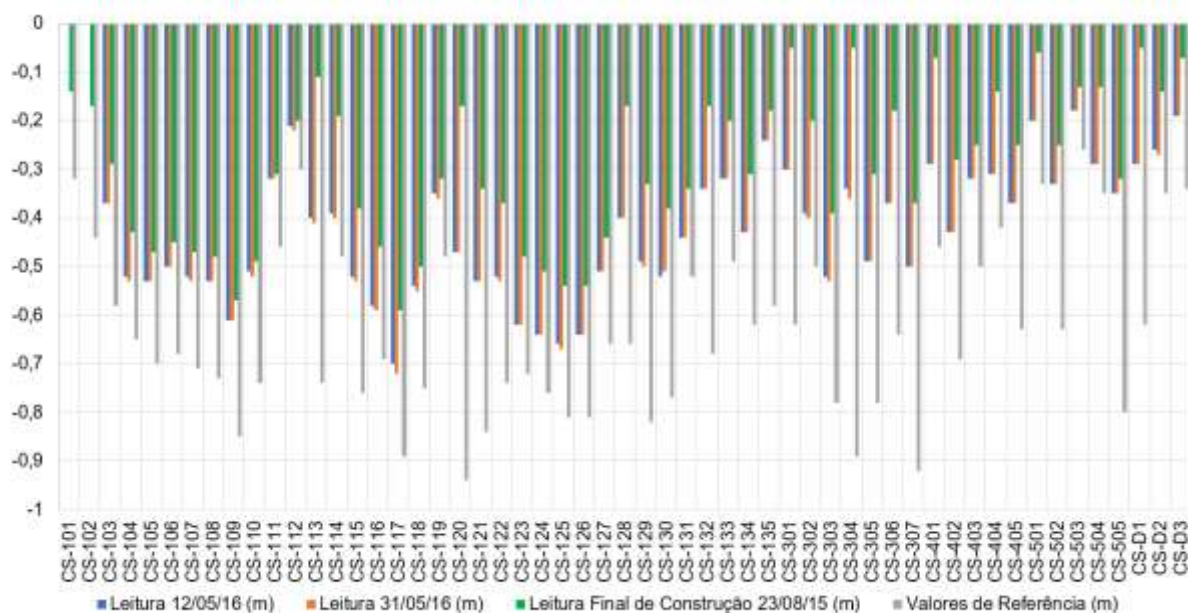


Figura 5 – *Leitura De Deformações Das Caixas Suecas*
 Fonte: Intertechne (2016).

De modo geral, observa-se uma tendência de estabilização nas estruturas das caixas suecas. A deformação da crista da barragem após o reservatório ser preenchido contribui com cerca de 0,04% da deformação total registrada (INTERTECHNE, 2016).

4. Análise de tensão e deformação

Nesse contexto, exploraremos a apresentação de cenários computacionais que têm como objetivo proporcionar uma compreensão abrangente das tensões e deformações, com um foco específico nas áreas adjacentes aos pontos de monitoramento instalados na Barragem. Uma das principais metas é aprimorar a rigidez da interface entre a face de concreto e o enrocamento, através de uma abordagem analítica alternativa. A elaboração deste estudo se baseia nos princípios e objetivos da análise paramétrica e analítica, buscando expandir e validar a atenção voltada para a análise holística. Isso envolve uma consideração direta dos efeitos dos parâmetros de deformabilidade dos materiais. Esses parâmetros incluem:

As características mecânicas do material rochoso utilizado na construção do Enrocamento com Face de Concreto da Barragem, a configuração geométrica das camadas internas da Barragem, incluindo a densidade dos materiais e a distribuição deles na seção planejada, o comportamento mecânico global tanto do maciço da Barragem quanto da fundação de apoio, a comparação dos parâmetros de deformabilidade dos materiais, envolvendo dados provenientes de ensaios de laboratório e informações obtidas por meio da análise retroativa da instrumentação de monitoramento já existente.

Os cenários de avaliação propostos englobam principalmente a substituição integral do material 3B (Enrocamento) pelo material 3B' (Cascalho) por meio de uma análise tridimensional. Além disso, uma avaliação bidimensional apresentará a substituição de faixas de 15 e 30 metros, adjacentes à laje de concreto, pelo material 3B' (Cascalho). Para estabelecer comparações entre as análises tridimensionais e bidimensionais, os resultados foram confrontados com medições de monitoramento obtidas nas caixas suecas implantadas no corpo da barragem.

Dessa maneira, esse estudo conduziu a uma avaliação completa entre os diversos cenários, levando em consideração as diferentes características dos materiais e os dados fornecidos pela instrumentação de monitoramento. Isso desempenhará um papel importante ao enriquecer a compreensão do comportamento estrutural de uma Barragem de Enrocamento com Face de Concreto.

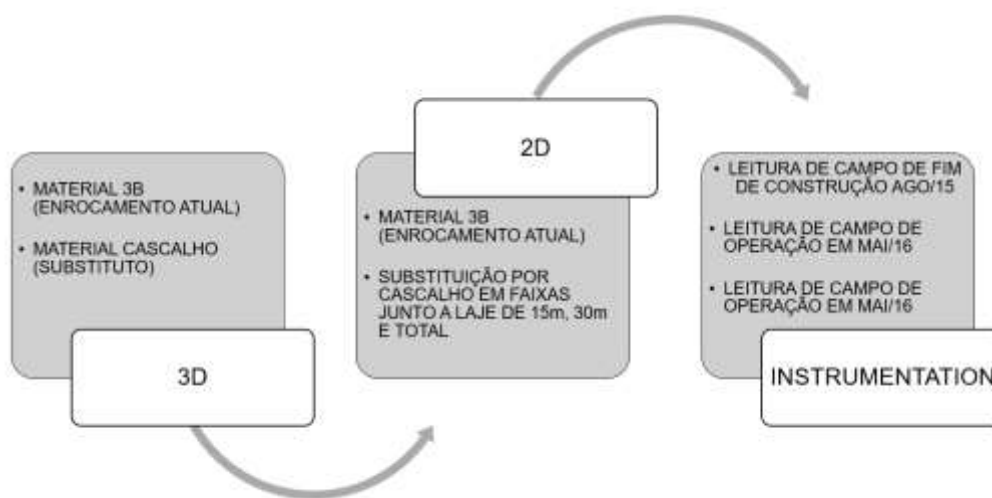


Figura 6 – Cenários de Avaliação
 Fonte: Autores (2017).

Tratando-se de uma barragem com uma altura que ultrapassa 200 metros, construída em um vale de topografia fechada, conforme ilustrado na FIGURA 7. abaixo, adotou-se uma abordagem que inclui uma análise por etapas do processo de construção. Essa abordagem visa a acompanhar a progressão do aumento do aterro por meio de cálculos evolutivos. A análise é conduzida seguindo o mesmo critério utilizado para o material 3B, o qual envolve a consideração da construção do aterro em camadas, respeitando as etapas e sequência de construção previamente definidas pela construtora.



Figura 7 – Vale encaixado na Região de Apoio da Barragem
 Fonte: Intertechne (2016).

Portanto, durante o processo da modelagem foram utilizadas cinco etapas de carregamento construtivo parcial e uma etapa final simulando a fase de carregamento do reservatório, simulando a programação e planejamento de cronograma elaborado pela construtora conforme a FIGURA 8 abaixo.

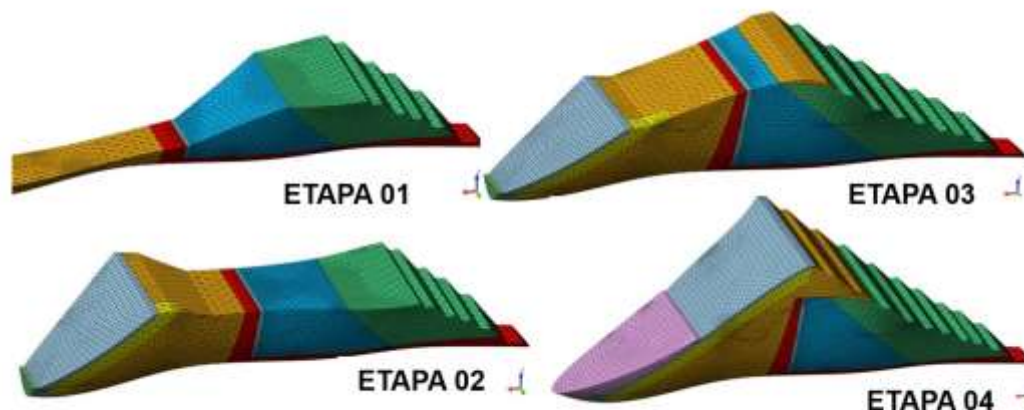


Figura 8 – Etapas de Construção da Barragem de Chaglla
Fonte: Intertechne (2017).

Durante o estágio inicial da concepção do projeto pela empresa de engenharia, a disposição dos materiais na barragem de enrocamento com face foi estrategicamente planejada. O objetivo principal era conferir à estrutura de aterro uma capacidade global de resistir a deformações mínimas, harmonizando-se de maneira intrínseca com a topografia e composição do local. No que diz respeito aos elementos de maior dimensão do material 3B (Enrocamento), os parâmetros iniciais de resistência foram progressivamente ajustados ao longo do processo construtivo da barragem.

Os índices de deformabilidade dos materiais foram obtidos a partir de testes de carga em placa, previamente realizados em projetos semelhantes, apoiados em referências técnicas confiáveis e na experiência acumulada pela Intertechne em empreendimentos de natureza comparável. Além disso, os índices de deformabilidade foram refinados com a utilização de ferramentas como a caixa sueca e placas magnéticas, contribuindo para uma calibração mais precisa. A otimização desse parâmetro foi realizada ao longo da construção da barragem, por meio da aplicação de um modelo tridimensional que considerou a evolução das condições durante todo o processo.



Figura 9 – Seção Típica da Barragem
Fonte: Intertechne (2017).



Figura 10 – Material 3B Enrocamento e 3B' Cascalho

Fonte: Odebrecht (2014)

Tabela 2 – Materiais da Barragem.

Zona	Descrição do Material	Ø Max (cm)	Finos (%)	Espessura de Camada (cm)
1A	Silte - Material Colmatante	0,10	-	25,00 (SOLTA)
1B	Randon	20,0	Sem finos	40,00 (SOLTA)
2A	Areia	1,91 (3/4")	< 5%	40,00
2B	Transição Única	10,00	< 8%	40,00
3B'	Cascalho Natural do Leito Do Rio	50,00	< 8%	60,00
3B	Enrocamento de Rocha Sã	50,00	< 8%	60,00
3C	Enrocamento de Rocha Sã	70,00	< 5%	80,00
3C'	Enrocamento de Rocha Sã	35,00	< 5%	40,00
3Ca	Enrocamento com Finos	70,00	< 10%	80,00
3D	Enrocamento de Rocha Sã	70,00	< 8%	80,00
3E	Enrocamento Fino	30,00	< 10%	80,00
4	Blocos de Rocha Sã Arrumados na Face de Jusante da Barragem com a maior parte na Face Horizontal	120,00		
F	Filtro	20,00	< 5%	40,00
T	Material de Rocha Medianamente ou Pouco Alterada ou Fraturada	35,00	< 15%	40,00

Fonte: Intertechne (2015).

Tabela 3 – Parâmetros Geotécnicos Dos Materiais.

Zona	Material	Peso Específico	E (MPa)	Poisson
1B	Randon	20	80	0,3
3A	Enrocamento de Rocha Sã	20	110	0,3
3B	Enrocamento de Rocha Sã	21	110	0,3
3B'	Cascalho Natural do Canal	21	180	0,3
3C	Enrocamento com Finos	21	100	0,3
3D	Enrocamento de Rocha Sã	21	100	0,3
-	Aluvião	20	110	0,3
-	Concreto	25	21000	0,25
F	Filtro	20	110	0,3
T	Material de Rocha Medianamente ou Pouco Alterada ou Fraturada	21	80	0,3

Fonte: Intertechne (2015).

A seguir é apresentado à simulação do comportamento tridimensional e bidimensional de tensão e deformação por meio de modelagem numérica. Essa simulação foi conduzida utilizando principalmente o software MIDAS GTS NX, que executa o modelo de forma analítica por meio do Método dos Elementos Finitos (MEF). No entanto, permitiu-se a avaliação dos resultados do comportamento da barragem de enrocamento com revestimento de concreto de Chaglla, caso o material 3B' (cascalho) fosse empregado na zona 3B (enrocamento) do zonamento.

A análise foi realizada utilizando um modelo fundamentado em uma equação de Elasticidade Linear. Dessa forma, os estudos e simulações tridimensionais apresentam resultados referentes aos deslocamentos do maciço de enrocamento. Isso possibilitaria uma comparação com os dados provenientes dos instrumentos de medição durante a fase final da construção.

5. Análise tridimensional (3d)

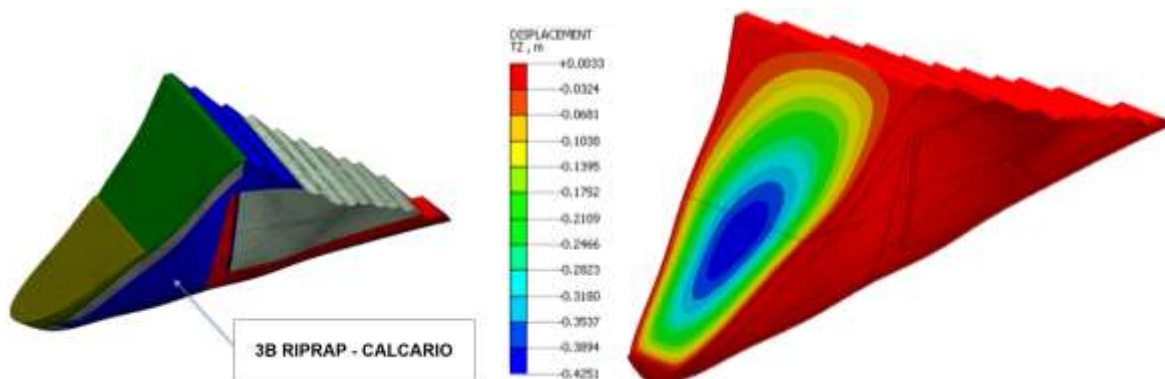


Figura 11 – Análise 3d – Vista Isométrica da Barragem como os Materiais de Projeto – Material 3b

Fonte: Autores (2017)

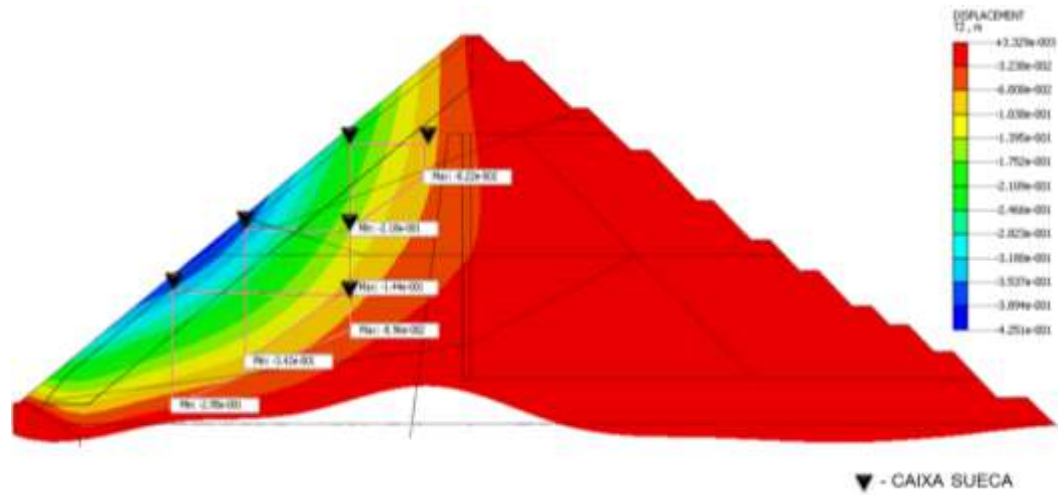


Figura 12 – Material 3b – Enrocamento atual Deslocamento Vertical Modelo Midas – Caixas Suecas
Fonte: Autores (2017)

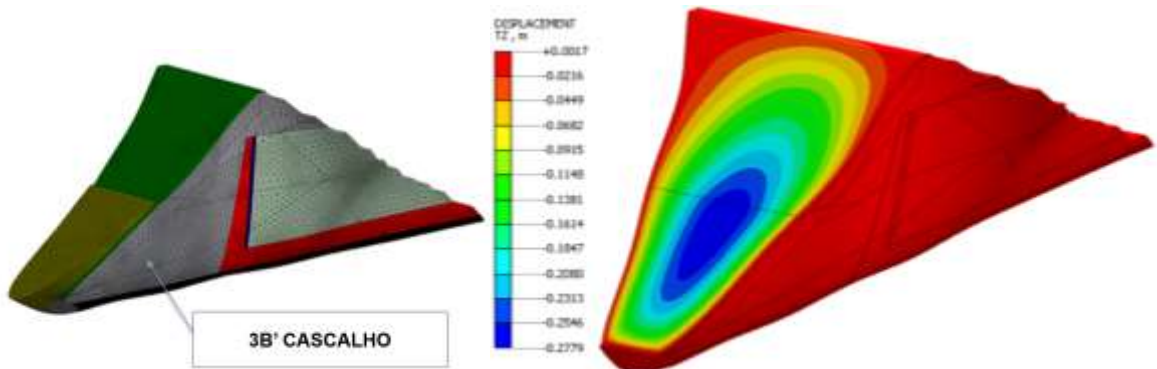


Figura 13 – Material 3b' – Cascalho - Vista Isometrica
Fonte: Autores (2017)

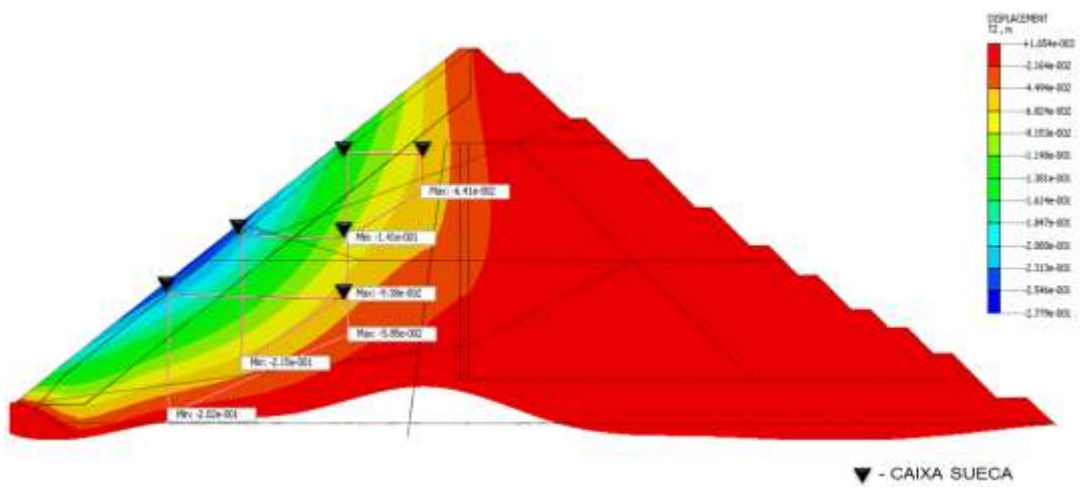


Figura 14 – Material 3b' – Cascalho
Deslocamento Vertical Modelo Midas – Deslocamento Nas Caixas Suecas
Fonte: Autores (2017)

A partir da análise em duas dimensões realizada em dois cenários distintos para fins de comparação, como demonstrado TABELA 4, é evidente que a alternativa mais eficaz consiste na substituição completa do material Enrocamento 3B pelo Cascalho. A simulação numérica revelou que no ponto mais crítico, utilizando o material 3B, ocorre um deslocamento na direção da laje de 51 cm, enquanto com o material 3B' (Cascalho) esse deslocamento é reduzido para apenas 34 cm. Em outras palavras, a deformação do Cascalho é 18 cm menor do que a do material 3B. Resumindo os resultados para os demais cenários, nos trechos de comprimento 128 m, os deslocamentos na direção da laje são os seguintes:

Material 3B - Enrocamento = 0,51 m

Material 3B' - Cascalho = 0,34 m (Substituição Total)

Isso representa uma notável melhora de aproximadamente 67% na redução do deslocamento na direção da laje, quando se opta pelo material de Cascalho em vez do Enrocamento 3B.

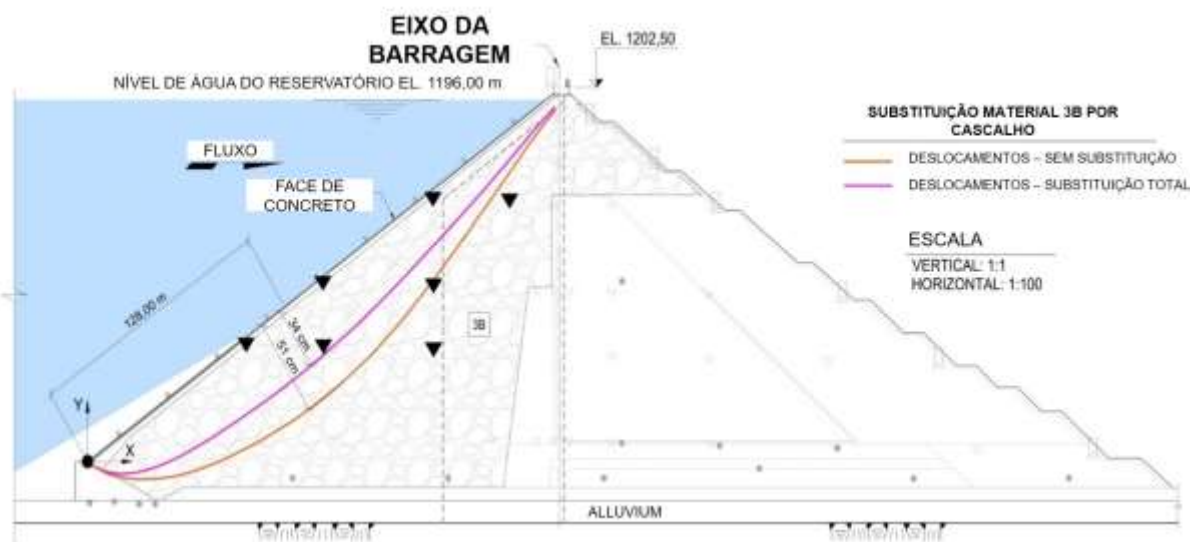


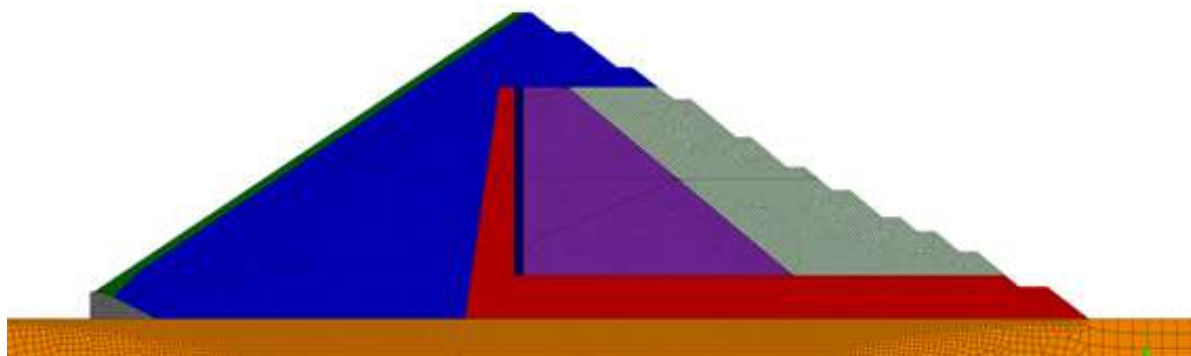
Figura 15 – Deslocamentos da Laje (Modelo 3d)
Fonte: Autores (2017)

Tabela 4 – Comparação dos Deslocamentos Verticais.

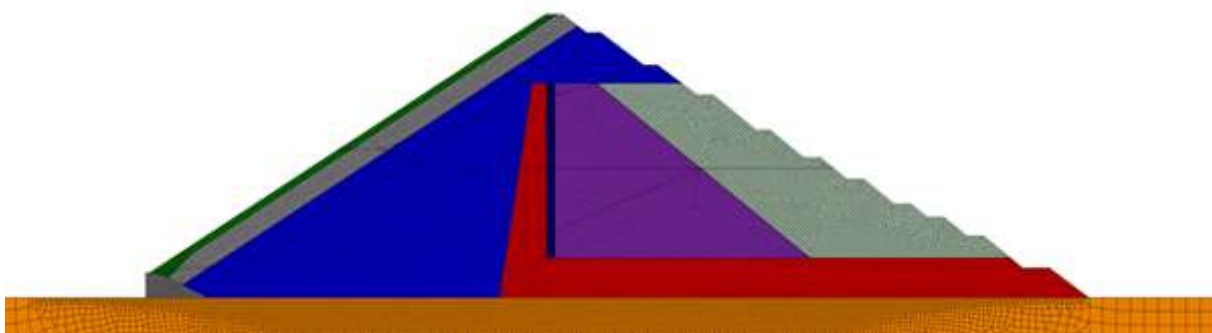
Caixa Sueca	Cota Instalação (m)	Deslocamento Vertical Midas Material 3B (m)	Deslocamento Vertical Midas Cascalho (m)	Leitura Final Construção 23/08/15 (m)	Leitura 12/05/2016 (m)	Leitura 31/05/2016 (m)
CS-301	1067,69	-0,30	-0,20	-0,05	-0,30	-0,30
CS-303	1065,31	-0,09	-0,06	-0,39	-0,52	-0,53
CS-304	1099,15	-0,34	-0,22	-0,05	-0,34	-0,34
CS-305	1097,80	-0,14	-0,09	-0,31	-0,49	-0,49
CS-306	1141,91	-0,22	-0,14	-0,18	-0,37	-0,37
CS-307	1141,07	-0,08	-0,06	-0,37	-0,50	-0,50

Fonte: Autores (2017)

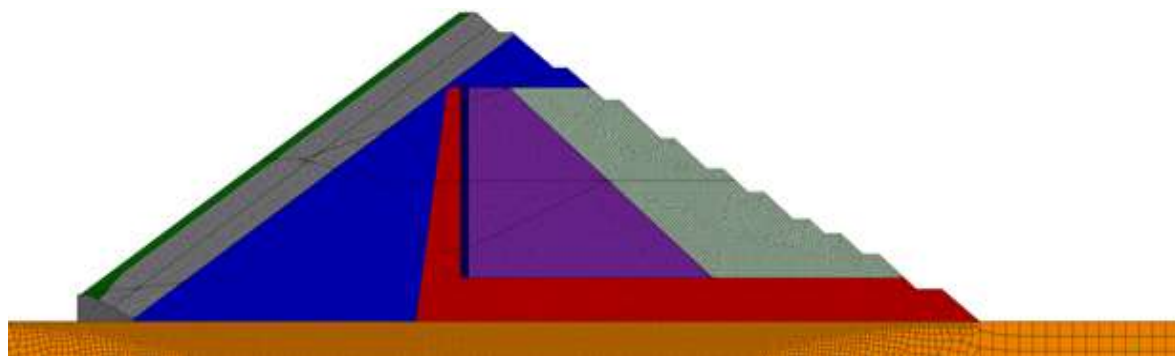
6. Análise bidimensional (2d)



*Figura 16 – Análise 2d – Seção Transversal da Barragem como os Materiais de Projeto
Fonte: Autores (2017)*



*Figura 17 – Análise 2d – Seção Transversal da Barragem com Substituição de 15m do Material 3b pelo 3b'
Fonte: Autores (2017)*



*Figura 18 – Análise 2d – Seção Transversal da Barragem com Substituição de 30m do Material 3b Pelo 3b'
Fonte: Autores (2017)*

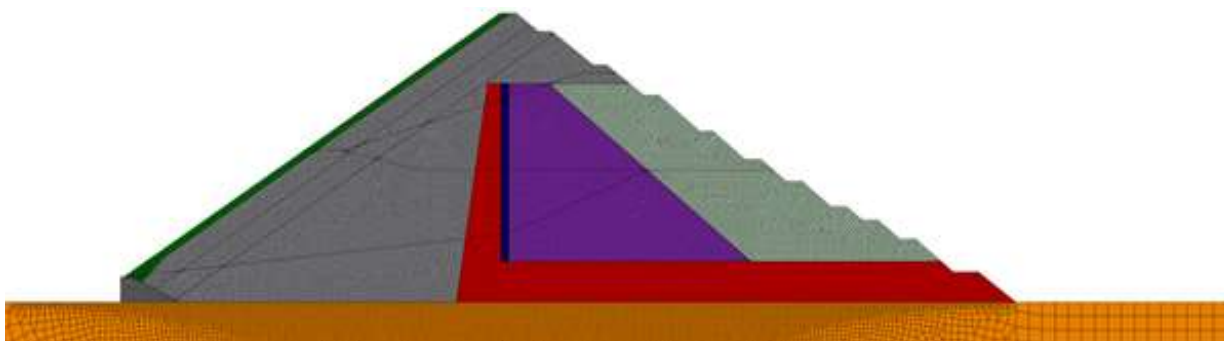


Figura 19 – Análise 2d – Seção Transversal da Barragem com Substituição Total do Material 3b Pelo 3b'
Fonte: Autores (2017)

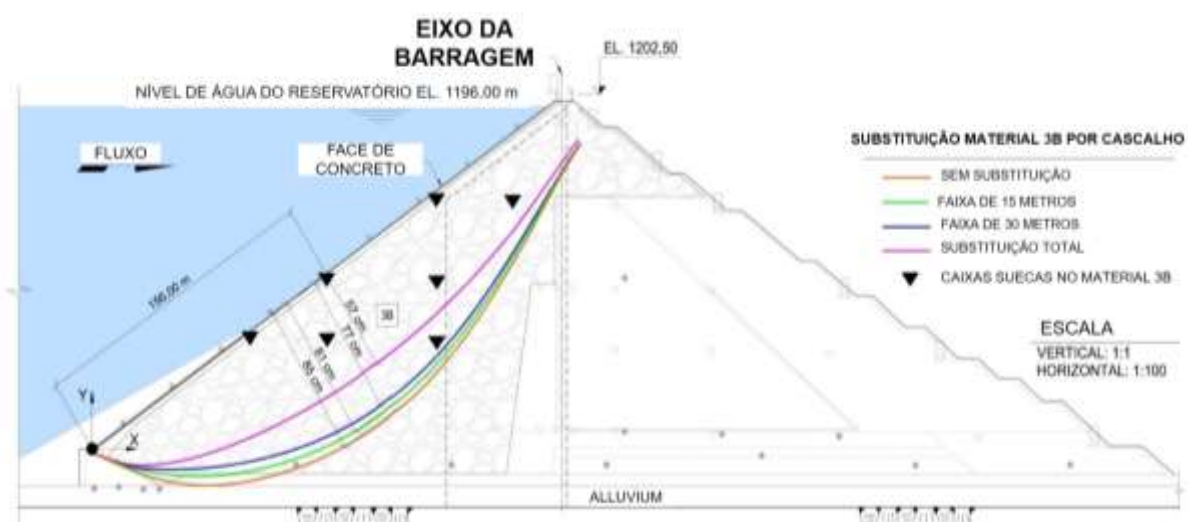


Figura 20 – Deslocamentos da Laje Modelo 2d – Na Seção Típica de Projeto
Fonte: Autores (2017)

Através da análise em quatro cenários distintos utilizando uma abordagem bidimensional, é perceptível que a solução mais eficaz consiste na substituição completa do Material 3B pelo Cascalho. Isso é evidenciado particularmente em um ponto crítico, onde a deformação alcança 85 cm com o uso do Material 3B, enquanto com a adoção do Cascalho (designado como 3B'), a deformação é reduzida para 56 cm. Em outras palavras, a substituição pelo cascalho resulta em uma redução de 29 cm na deformação, em comparação com o uso do Material 3B.

Os demais cenários também apresentaram eficiência na substituição do principal material do corpo desta barragem, a seguir os valores obtidos na análise bidimensional:

Deformação na direção da laje com Material 3B (Conforme Projeto) = 0,85 metros

Substituição por cascalho - Extensão de 15 metros = 0,81 metros

Substituição por cascalho - Extensão de 30 metros = 0,77 metros

Substituição por cascalho - Substituição total = 0,57 metros

Portanto, é possível constatar uma redução de aproximadamente 67% no deslocamento na direção da laje ao optar pela substituição total pelo cascalho.

7. Resultados e discussão

Neste segmento, apresentamos os desfechos e uma síntese da análise tridimensional e bidimensional, considerando a comparação entre a substituição do Material 3B, originalmente planejado como enrocamento, pelo Cascalho (3B') em

diversas proporções volumétricas. Essas proporções foram discretizadas em faixas paralelas à inclinação do talude da laje de concreto, localizadas no espaldar de montante. A TABELA 5 e FIGURA 21 a seguir ilustram a tendência de comportamento dos materiais durante o processo de substituição. Entretanto, é notável que à medida que mais material é substituído, a deformação diminui, o que resulta em uma melhoria na rigidez e no comportamento do material rochoso.

Tabela 5 – Deslocamentos da Laje versus Substituição do Material 3b por Cascalho (3b').

Material	Espessura De Substituição Por Cascalho (M)	Área De Substituição (M ²)	(%) Função Da Área	Deslocamentos No Centro Da Laje (Análise 2d) (M)	Deslocamentos No Centro Da Laje (Análise 3d) (M)
3b	0	-	0%	0,85	0,51
Cascalho	15	4.557	23%	0,81	0,47
Cascalho	30	9.351	48%	0,77	0,42
Cascalho	45	13.827	71%	0,66	0,38
Total	100	19.547	100%	0,57	0,33

Fonte: Autores (2017)

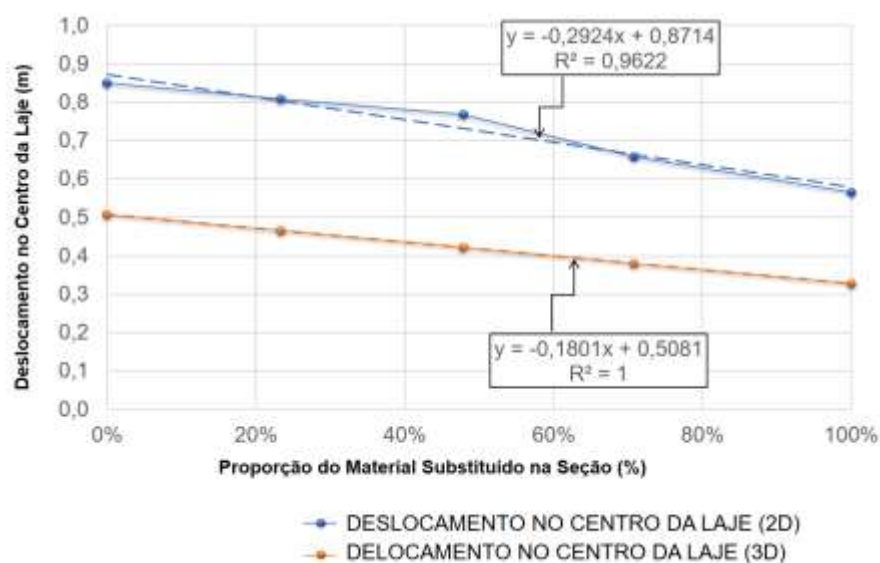


Figura 20 – Deslocamentos da Laje versus Substituição do Material 3b por Cascalho (3b')

Fonte: Autores (2017)

8. Considerações finais

As principais características geomecânicas dos enrocamentos para avaliar seu comportamento global são a resistência ao cisalhamento e a deformabilidade. Esses parâmetros, se não estiverem compatíveis com os limites reais de tensão aplicados, podem resultar em fenômenos como recalques diferenciais e trincas, os quais têm o potencial de comprometer tanto a funcionalidade quanto a segurança da estrutura da barragem.

As diferenças entre os materiais baseiam-se principalmente em sua forma. O Material 3B (enrocamento) é originado de escavações por explosivos e consiste em blocos de formato irregular, com extremidades de cantos vivos. Essa característica influencia diretamente a compactação do aterro, pois durante o processo, os blocos tendem a quebrar nas extremidades, gerando uma quantidade significativa de partículas finas no zonamento do Material 3B. Por outro lado, o Material 3B' (cascalho), além de satisfazer os requisitos granulométricos do projeto, possui uma forma arredondada que facilita o encaixe durante a compactação com rolo pneumático.

Dentre as qualidades relevantes para esse processo de execução, destacam-se a baixa alterabilidade, que previne a desagregação e melhora a durabilidade; a resistência mecânica adequada às demandas de serviço; e a forma e distribuição granulométrica apropriadas para garantir a estabilidade estrutural. Uma diferença notável entre os enrocamentos é o módulo de deformabilidade (E), que apresenta uma discrepância de 70 MPa.

A análise dos resultados obtidos por meio de simulações com modelos matemáticos no software Midas, em conjunto com a comparação dos dados obtidos por instrumentos de monitoramento, conduz à conclusão de que a exploração de alternativas no projeto de barragens resulta em benefícios concretos. Essa abordagem possibilita a previsão de cenários considerando sustentabilidade, custos, prazos e disponibilidade de recursos naturais em proximidade razoável. A investigação detalhada de materiais e fundações por meio de ensaios geotécnicos é fundamental para um projeto coeso e preciso, visando antecipar o comportamento estrutural da barragem e seus impactos pós-construção.

No contexto da construção desse tipo de barragem, fica evidente que as tendências de comportamento são expressas através de dados e resultados provenientes de modelagens numéricas. Mesmo quando baseados em parâmetros empíricos, esses modelos podem ser ajustados durante a fase construtiva por meio das leituras dos instrumentos de monitoramento instalados. É relevante enfatizar que a modelagem numérica de tensão e deformação desempenha um papel crucial na análise abrangente do comportamento de uma barragem, como no caso da barragem de Chaglla. Essa abordagem deve ser empregada desde a fase construtiva até o enchimento do reservatório e pode se estender ao longo de toda a vida útil da barragem.

O objetivo principal deste estudo foi comparar a substituição do Material 3B (enrocamento) pelo Cascalho 3B', tendo-se observado um desempenho superior na utilização do Cascalho. As simulações indicaram menores deformações, especialmente na região próxima à laje de concreto, onde o ponto mais crítico apresentou uma redução de deslocamento na direção da laje de aproximadamente 67%. A diferença no módulo de deformabilidade é o parâmetro que influencia diretamente nas deformações obtidas nas simulações, tanto bidimensionais quanto tridimensionais, com o uso do software Midas.

Após todas as análises, uma prática de grande relevância foi a observação dos dados de monitoramento obtidos por meio de instrumentos instalados ao longo da construção. Além de confrontar os dados projetados, essa prática confirma os parâmetros com base em experiências de outras obras, permitindo uma avaliação direta da segurança estrutural. Os deslocamentos medidos resultam da combinação de diversas solicitações ocorridas na barragem e da rigidez da estrutura.

Agradecimentos

A empresa Intertechne pelo disponibilidade dos dados.

Referências

- BARRETO, M. P., & LOPES, J. C. (2017). *Barragem de enrocamento com face de concreto: Central Hidroelétrica Chaglla, Peru: Análise numérica: Estudo de tensão e deformação* (152 p.). Curitiba. Available at <https://biblioteca.sophia.com.br/terminal/5523/acervo/detalhe/101517>. Accessed May 30, 2024.
- CELESTINO, T. B., & WATTNABE, R. M. (1973). *Uma comparação entre análises planas e tridimensionais em tensões e deslocamentos em barragens de terra - Aplicação à usina de ilha Solteira*. In: IX Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro-RJ.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS (2010). *Concrete Face Rockfill Dams: Concepts for design and construction*. Paris.
- COOKE, J. B., & SHERARD, J. L. (1987). *Concrete Face Rockfill Dam: I. Assessment; II Design*. In: *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 113(10).

- CRUZ, P. T., et al. (2004). *100 Barragens Brasileiras Casos Históricos Materiais de Construção Projeto (2a edição)*. São Paulo: Oficina de Textos.
- CRUZ, P. T., et al. (2014). *Barragem de Enrocamento com face de concreto (2a edição)*. São Paulo: Oficina de Textos.
- DUTRA, P., et al. (2016). *Comportamento da BEFC de Chaglla*. In: COBRAMSEG, Belo Horizonte-MG, out.
- EISENSTEIN, Z. A. V. G., KRISHNAYYA, N. R., & MORGENSTERN, N. R. (1972). *An analysis of cracking in earth dams. In: Proc. Symp. on Application of Finite Element Method in Geotechnical Engineering, vol.1*. Vicksburg, Mississippi.
- FERNANDES, A. R. D. (2007). *Relato - Tema 100 - Construções de Barragens. In: XXVII Seminário Nacional de Grandes Barragens*. Belém-PA, jun.
- ICOLD. (1988). *Inspection of Dams - Bulletin 62. Paris: International Commission on Large Dams*.
- INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2016). *General - Proyecto Central Hidroeléctica Chaglla - Análisis de la Instrumentación - Lecturas Hasta 31 de mayo de 2016 - 1109-CG-8-GE-G00-00-C-32-RT-0004*, mai.
- INTERTECHNE CONSULTORES S.A. (2016). *General, Manual de Operación y Control de los Instrumentos Civiles - Manual de Instrumentación - 1109- CG-8-GE-G00-00-C-32-MN-1502*, ago.
- JEISS, M. W., CALCINA, A. M., PINTO, C. L., & BORGATI, L. (2015). *Barragem de Chaglla - Principais Aspectos. In: XXX Seminário Nacional de Grandes Barragens*. Foz do Iguaçu-PR, mai.
- MATERÓN, C. B. (2017). *Diretrizes técnicas para barragens de enrocamento com face de concreto (BEFC) e com núcleo de asfalto (BENA)*. Comitê Brasileiro de Barragens, Rio de Janeiro.
- MATERÓN, C. B., et al. (2011). *Considerations on the Seismic Design of High Concrete Face Rockfill Dams (CFRDs)*, ICOLD. Rio de Janeiro-RJ, Out.
- MORI, R. T. (1994). *Barragens de enrocamento com face de concreto - Um novo selante para as juntas*. XXI CBBDD Tema 1. Dez.
- ODEBRECHT ENERGIA. (2015). *Presa: Control de los Materiales.3B' - Material procedente de cantera Japuar (cauce de rio) - Km 0+650 - Resultados, p. 18*, ago.
- ODEBRECHT ENERGIA. (2014). *Presa: Control de los Materiales.3B - Material de ACP 18 (lavado en río huallaga)*, p. 16, jul.
- PEREIRA, S. M. F. (1996). *Análise tridimensional em interface solo-concreto de barragens. Dissertação de mestrado, Publicação G.DM-033a/96, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília. Brasília-DF*.
- PINTO, N. L. S. (2009). *The Design and Construction of Extra High CFRDs*. Hydropower & Dams, Issue Three.
- PINTO, N. L. S. (2007). *Very high CFRD dams – Behavior and design features*. In: III Symposium on CFRD-Dams Honoring J. Barry Cooke, fev.
- PINTO, N. L. S., & MARQUES, P. L. (1998). *Estimating the maximum face deflection in CFRD's*. In: Hydropower & DAMS, six.
- SABOYA JUNIOR, F. (2016). *Considerações sobre compressibilidade de Enrocamento e Determinação de Parâmetros para Análise Numérica de Barragens de Enrocamento com Face de Concreto*. In: II Simpósio sobre BEFC, Florianópolis-SC, pp. 99-118.
- SILVA, A. F. (2007). *Análises tridimensionais de barragens de enrocamento com Face de concreto com objetivo de otimizar os critérios de projeto*. Brasília.

SINGH, et al. (1990). *Nonlinear analysis of concrete face rockfill dam*. *Journal of Geotechnical Engineering*, May 1990, Volume 116, Issue 5 (822 - 837).

STRAUBAAR, R., et al. (2009). *Design Considerations of a High Rockfill Dam Nam Ngum 2 CFRD*, Lao PDR. The 1st International Symposium on Rockfill Dams, China.