

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/62

Estudo de Deformações Superficiais de um Modelo Reduzido de Barragem de Contrafortes por Meio de Instrumentação

Paulo Henrique Moura Moreira

Mestrando no Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Tecnologia e Gestão da Inovação (PPGTI), Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, Brasil, ph2moreira@unochapeco.edu.br

Fernanda Gral Ibrahim

Engenheira Civil, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, Brasil, fernanda.ibrahim@gmail.com

Paola Avila

Engenheira Civil, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, Brasil, paola.avila@unochapeco.edu.br

Marieli Biondo

Doutora em Engenharia Geotécnica, Vale SA, Belo Horizonte, Brasil, marieli.lopes@vale.com

Eduardo Roberto Batiston

Doutor em Engenharia Civil, Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, Brasil, erbatiston@unochapeco.edu.br

RESUMO: A literatura sobre barragens de concreto da tipologia contraforte é relativamente limitada, deixando uma lacuna significativa na compreensão dessas estruturas. A utilização de modelos físicos reduzidos para análises assume uma relevância no dimensionamento dessas barragens, especialmente devido à escassez de normas brasileiras específicas para orientar o dimensionamento desse tipo de construção. O objetivo desta pesquisa foi analisar o comportamento de deformações em uma barragem contraforte utilizando a instrumentação de um modelo físico em escala reduzida. Para isso, foi utilizado o Centro de Estudos Hidráulicos e Modelos Reduzidos da Unochapecó (CEHMU) e construído o modelo reduzido, no qual foram instalados oito extensômetros elétricos de resistência também conhecidos como *strain gages* (SG) instalados em quatro regiões diferentes. Foi realizado um plano experimental de ensaios estruturado em quatro fases com objetivo de captar as deformações físicas da estrutura e verificar seu comportamento estrutural. As deformações por compressão foram observadas: 4,88 $\mu\text{m}/\text{m}$ no Montante Superior, 3,99 $\mu\text{m}/\text{m}$ no Montante Inferior, 3,90 $\mu\text{m}/\text{m}$ na Jusante e 1,74 $\mu\text{m}/\text{m}$ no Contraforte. Com os resultados apresentados, foi possível concluir que há uma eficiência do sistema de monitoramento com resistores ao medir as deformações pontuais de barragem em escala reduzida.

PALAVRAS-CHAVE: Barragens de Contrafortes; modelo reduzido, instrumentação.

ABSTRACT: The literature on concrete dams of the buttress typology is relatively limited, leaving a significant gap in the understanding of these structures. The use of reduced-scale physical models for analysis assumes relevance in the design of these dams, especially due to the scarcity of specific Brazilian standards to guide the design of this type of construction. The objective of this research was to analyze the behavior of deformations in a buttress dam using instrumentation of a reduced-scale physical model. For this purpose, the Center for Hydraulic Studies and Reduced Models of Unochapecó (CEHMU) was used and a reduced-scale model was constructed, in which eight electrical resistance strain gauges (SG), installed in four different regions, were used. An experimental test plan was conducted in four phases aiming to capture the physical deformations of the structure and verify its structural behavior. Compression deformations were observed: 4.88 $\mu\text{m}/\text{m}$ in the Upper Upstream, 3.99 $\mu\text{m}/\text{m}$ in the Lower Upstream, 3.90 $\mu\text{m}/\text{m}$ in the Downstream, and 1.74 $\mu\text{m}/\text{m}$ in the Buttress region. With the presented results, it was possible to conclude that there is efficiency in the monitoring system with resistors when measuring the point deformations of the dam in reduced scale..

KEYWORDS: Buttress dam; Reduced scale model; Instrumentation.

1 INTRODUÇÃO

Os procedimentos usuais de verificação da estabilidade global, empregados em barragens de concreto, são baseados em métodos empíricos e no emprego de fatores de segurança, que se utilizam de métodos baseados em simplificações para as definições dos carregamentos atuantes, parâmetros das resistências e dos modelos do comportamento mecânico. Por sua vez, inserem incertezas nesses procedimentos de análise que os acompanham ao longo de todo o ciclo de vida da estrutura, desde a concepção até o final da vida útil. Essas incertezas geram riscos que podem ser agravados pela execução inadequada de qualquer uma das fases de uma obra de engenharia (projeto, construção, operação e desativação). As incertezas são inevitáveis, pois possuímos um conhecimento incompleto sobre a natureza, mas podem ser reduzidas com a coleta de dados reais e redução das incertezas de previsão (PIRES *et al.*, 2019).

Dimensionamentos de barragens têm aporte teórico fundamentalmente baseado nos critérios regidos pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS, 2003) e podem ser adotados guias e manuais norteadores da segurança, como o Guia Básico de Segurança de Barragens (CBDB, 2001) e o Manual de Segurança e Inspeção de Barragens (BRASIL, 2002), além de bibliografias nacionais e internacionais. Todavia, não existem normativas específicas no Brasil que regulamentem a elaboração de projetos dessa tipologia de estrutura.

As barragens com finalidade de produção de energia podem ser classificadas em dois grandes grupos de acordo com o material utilizado na sua construção: barragens de concreto, que podem ser do tipo gravidade, arco e contrafortes, e barragens convencionais de terra ou enrocamento (HICKMANN, 2016).

O modelo de barragem em estudo é o modelo contraforte, pelo qual oferece a vantagem da redução do volume de concreto e diminuição do esforço de subpressão (tensão positiva) devido a sua menor área em contato com a fundação, obtendo-se assim uma desvantagem pelo peso próprio estar apoiado sobre essa área de contato reduzida, que gera um acréscimo de tensão de compressão na fundação, o que pode exigir alternativas adicionais ao projeto como tratamento com tirantes, injeção de calda e drenagem profunda. (ARACAYO, 2016).

As barragens de contraforte pertencem a uma tipologia específica de barragem, barragem de gravidade, onde a grande massa de concreto é reduzida e as forças são desviadas para a fundação da barragem por meio de contrafortes verticais ou inclinados (ASDSO, 2021). São constituídas por uma laje plana de concreto, suportada por um contraforte com geometria geralmente triangular. Sua laje de concreto tem a função de transferir as cargas da água armazenada para o contraforte, que por sua vez transfere o carregamento à fundação mediante as forças de contato superficial (E.ON, 2013 apud QUEIROZ, 2018).

Portanto, quando comparada às barragens de gravidade, as barragens contraforte tem a vantagem que requerem menos material devido à resistência do concreto, mas, em contrapartida, exigem um projeto estrutural mais complexo e mais detalhado, pois, os contrafortes agem como suporte e são construídos ao longo da barragem em determinados intervalos e a jusante do barramento. Por consequência disto, exige-se também um projeto de fôrmas na sua execução (VALTERSSON e JOHANSSON, 2018).

O presente estudo tem como objetivo principal desta pesquisa foi analisar o comportamento de deformações em uma barragem contraforte utilizando a instrumentação de um modelo físico em escala reduzida durante as etapas de enchimento do reservatório.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada no Centro de Estudos Hidráulicos e Modelos Reduzidos da Unochapecó (CEHMU) localizado nas dependências da Universidade Comunitária da Região de Chapecó (Unochapecó) que contem um tanque em alvenaria de blocos de concreto e vidros instalados em suas laterais para permitir a visualização do comportamento dos modelos limitados. O tanque de ensaios, representado na Figura 1, foi projetado com dois patamares horizontais em fibra de vidro sobre blocos de EPS como demonstrado. O primeiro nível possui saídas conectadas a uma cisterna de 600 litros para abastecimento por gravidade.

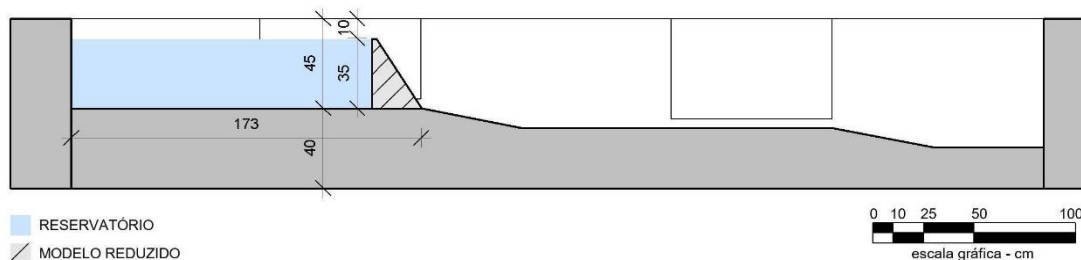


Figura 1. Corte longitudinal tanque de ensaios CEHMU.

2.1 Construção, Cura e Instalação do Modelo Reduzido

Para a definição das dimensões do modelo reduzido foi utilizado como referência os resultados obtidos por Soares (2014) que afirmam que uma barragem contraforte em escala real com seção composta por altura de 3,50 m, comprimento do contraforte de 2,74 m, espessura da laje à montante e do próprio contrafortes iguais a 50 cm, e vãos entre os contrafortes iguais a 2,25 m, caracteriza uma estrutura segura em relação à estabilidade global. Porém optou-se por diminuir os vãos entre os contrafortes para 17,50 cm, em relação ao considerado seguro por Soares (2014), a fim de que estes fossem alocados de forma igualmente espaçada ao longo de todo o comprimento do barramento, bem como arredondar o comprimento do contraforte para 28 cm. Estas dimensões foram adotadas como base na concepção do modelo físico para a modelagem numérica deste trabalho, utilizando uma escala de redução de 1:10 para tornar a seção compatível ao tanque de ensaio.

A estrutura foi executada em concreto pré-moldado, com fôrmas de MDF de 6 mm de espessura, com encaixes macho fêmea nas bordas de cada face e foi utilizado adesivo instantâneo multiúso para fixar todos os componentes, foi levada em consideração na extensão da laje e nos contrafortes do modelo foi empregada uma tela galvanizada de malha 4 e BWG 21 para simular a armadura de aço da estrutura em escala real.

Assim, optou-se por utilizar um concreto composto por areia grossa, cimento CP II-F-32 e pedrisco, no traço de 1:1,9:2,21, com fator de água/cimento (a/c) igual a 0,5 e fck de 20 MPa com adição de um aditivo superplastificante sintético à base de polímeros policarboxilatos na dosagem de 0,5% sobre a massa de cimento. Foi realizado o controle tecnológico do concreto realizando o ensaio de compressão do corpo de prova com a idade de 12 dias e obtendo resistência de 20,86 Mpa.

A desforma ocorreu sete dias após a concretagem e em seguida foi mantido a estrutura em câmara úmida, para cura do concreto, por um período de cinco dias. Na sequência, foi alocado no interior do tanque de ensaios do CEHMU e posteriormente foi realizado o tratamento de impermeabilização e fixação da superfície da estrutura em contato com o tanque conforme demonstrado na Figura 2.



Figura 2. Instalação da instrumentação finalizada

2.2 Instrumentação do Modelo Reduzido

Em seguida o modelo reduzido construído foi equipado com instrumentação em oito pontos diferentes conforme a Figura 3, todos dispostos de maneira simétrica empregando extensômetros elétricos de resistência, também conhecidos como *strain gages* (SG) pertencentes à marca HT Sensor Technology, modelo BE 120-5AA-X-4cm (5x3), com comprimento de 5 mm, resistência nominal de $120 \pm 0,2 \Omega$ e um fator de correção de $2,08 \pm 1 \%$.

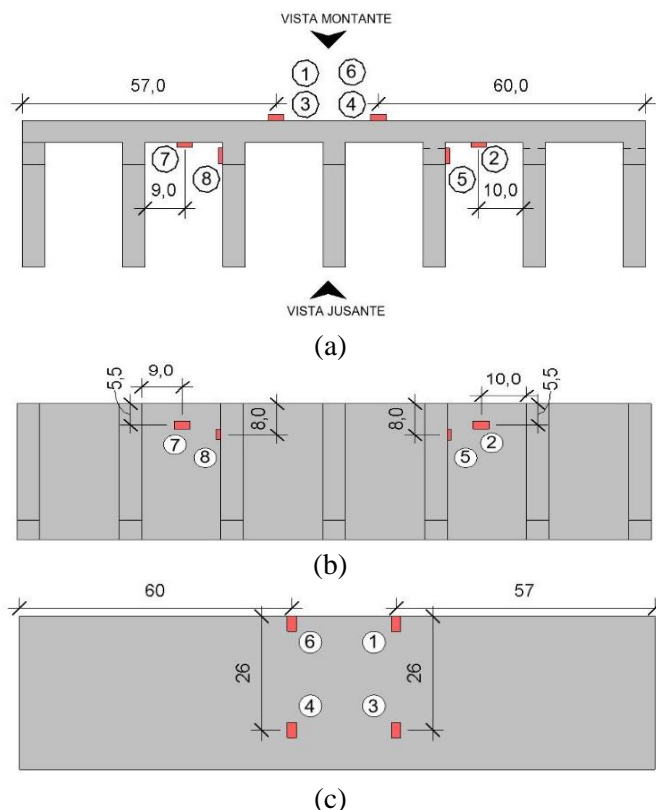


Figura 3 – Esquema do posicionamento dos extensômetros no modelo: Planta baixa (a); Vista jusante (b); Vista montante (c)

Na primeira seção, dois resistores foram instalados na parte inferior do barramento reduzido a montante, sendo denominados de "montante inferior". Esses resistores foram instalados os SG3 e SG4. Em outra seção, chamada "montante superior", mais dois resistores foram conectados os SG1 e SG6, ambos posicionados na direção vertical. Além disso, foram posicionados dois sensores na seção "jusante" do barramento, nos SG2 e SG7 na posição horizontal. Na seção denominada "contrafortes", posicionados na direção horizontal, também foram instalados dois sensores, os SG5 e SG8 conforme Tabela 1.

Tabela 1. Posicionamento dos extensômetros no modelo

Seção da barragem	SG de leitura	Posição
Montante inferior	SG3 e SG4	Vertical
Montante superior	SG1 e SG6	Vertical
Jusante	SG2 e SG7	Horizontal
Contrafortes	SG5 e SG8	Horizontal

Foi utilizado o sistema de aquisição de dados QuantumX (DAQ) modelo MX840B, que possui oito entradas analógicas. O equipamento responsável por captar os sinais dos sensores, filtrar e ampliar seus impulsos elétricos, além de tratar e captar os dados para armazenamento e disponibilizando em uma interface com um microcomputador adquirindo os dados dos SG's. Os dados coletados pelo QuantumX são

posteriormente processados e analisados pelo software OriginPro 2023b, para obter informações precisas sobre a integridade e a estabilidade da modelo reduzido

2.3 Plano Experimental do ensaio

Para garantir a precisão e a confiabilidade dos resultados, a execução do ensaio foi estruturada em quatro fases distintas, cada uma desempenhando um papel fundamental na coleta e análise dos dados e repetido o processo 8 vezes e nomeando cada execução como CCN1 a CCN8.

A primeira fase do ensaio consistiu em ligar o sistema de medições, sem quaisquer alterações no carregamento, com o propósito de permitir um aquecimento do sistema elétrico. Esse período de 5 minutos permitiu que o sistema alcançasse um estado térmico estável, essencial para garantir controles precisos e consistentes ao longo do ensaio.

Na segunda fase, iniciou-se o acionamento dos registros para o abastecimento do reservatório. O processo de enchimento do reservatório foi cuidadosamente realizado de forma gradual durante 56 minutos, permitindo observar e registrar o comportamento das estruturas conforme a água era acumulada. O objetivo principal desta fase era monitorar o processo de enchimento até que o reservatório estivesse completamente cheio, garantindo assim uma análise abrangente de como a estrutura reage às cargas em constante aumento.

Prosseguindo para a terceira fase, procedeu-se o esvaziamento do reservatório de maneira controlada. Essa etapa foi especialmente projetada para aliviar as cargas impostas pela fase anterior de enchimento gradual. O esvaziamento lento e controlado permitiu observar como a estrutura se comporta durante a liberação gradual das forças, visando a uma compreensão mais completa das respostas dinâmicas da estrutura em situações de mudanças de carga.

Por fim, a quarta fase consistiu no armazenamento dos dados coletados. Todas as medições, observações e registros foram cuidadosamente catalogados e transferidos para um computador para análise posterior. A partir desses dados, buscou-se identificar o comportamento da estrutura sob as condições de carregamento adotadas.

3 RESULTADOS

A água se acumula no reservatório, exercendo uma pressão hidrostática nas paredes da barragem e essa pressão aumenta conforme o nível de água aumenta. A Figura 4 demonstra o processo de enchimento adotado, que envolve o aumento gradual do nível da água dentro do reservatório da barragem até atingir o nível máximo da barragem, e em seguida foi realizado o esvaziamento do reservatório de forma gradual. Os níveis do reservatório estão demonstrados na figura em relação ao tempo de ensaio, e limitou-se ao tempo de 200 minutos para demonstração das tendências de seu comportamento.

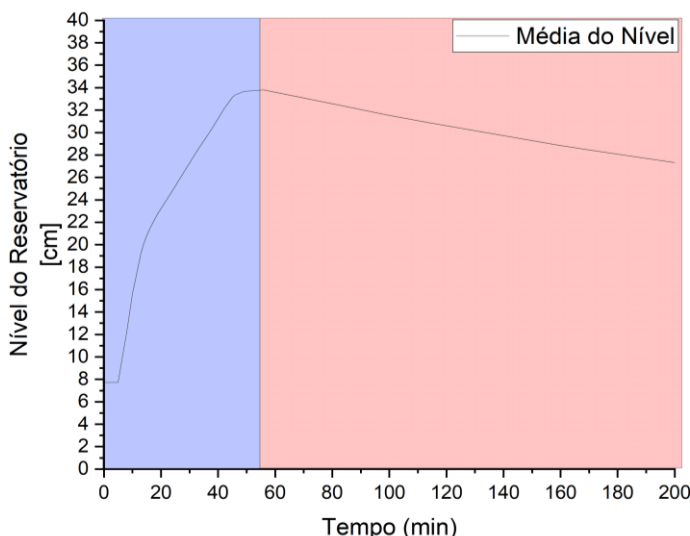


Figura 4. Nível do reservatório pelo tempo.

Ao examinar atentamente a Figura 4, é possível identificar uma fase particularmente significativa destacada na porção azul da figura. Essa fase abrange tanto a etapa 01 quanto a etapa 02 do ensaio experimental, nesse intervalo ocorre a preparação do sistema de medição e o subsequente enchimento da barragem. É relevante destacar que a cota máxima do nível de água atinge 34,2 cm e nota-se que o tempo necessário para atingir o enchimento total do reservatório foi precisamente de 56 minutos.

Para a análise da deformação na seção do modelo reduzido denominada de “Montante Inferior”, foi utilizado a média do SG 3, formada pela média dos ensaios CCN 01, CCN 03, e CCN 06 e foi utilizado também a média do SG 4, pelo qual, foram utilizados os dados dos ensaios CCN 04, CCN 06 e CCN 07. Os valores médios das deformações provenientes desses canais foram então sintetizados e estão representados de maneira clara na Figura 5.

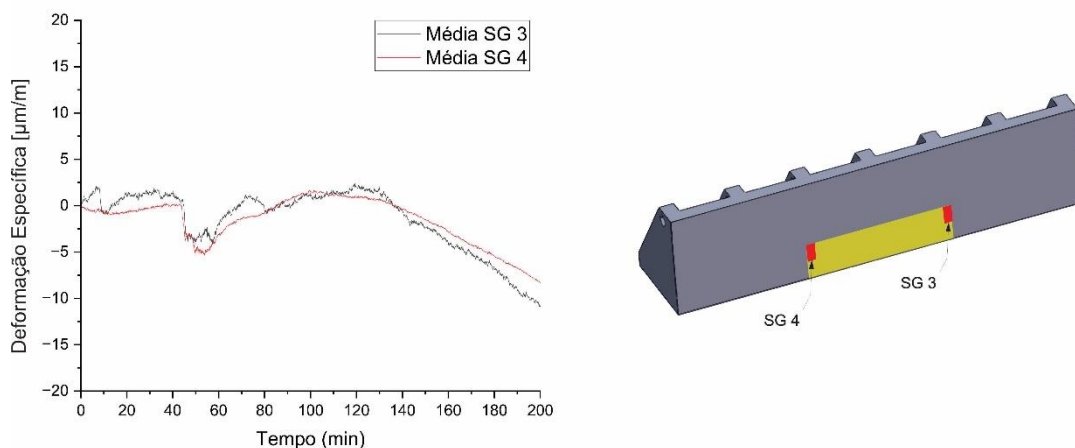


Figura 5. Ensaio de deformação específica na Montante Inferior

Embora a região de Montante Inferior possa ter experimentado uma compressão ao longo desse período, ao final desse ciclo, a estrutura retornou sua condição de deformação semelhante à sua posição inicial. Contudo, a partir do marco temporal de 44 minutos, surgiu um novo padrão de deformação, caracterizado por uma mudança abrupta e negativa. Essa alteração refletiu um deslocamento leve da estrutura, ocorrendo antes da manifestação da máxima tensão hidráulica.

Na análise da seção do modelo reduzido denominado Montante Superior, adotou-se uma abordagem que compreende o SG 1 e o SG 6. No SG 1, a média foi inserida com base nos ensaios CCN 04, CCN 06, CCN 07 e CCN 08. Da mesma forma, no SG 6, os resultados dos ensaios CCN 04, CCN 06, e CCN 07 foram usados para derivar a média. Esses valores médios de deformação vindos desses canais foram cuidadosamente combinados e estão visualmente representados na Figura 6.

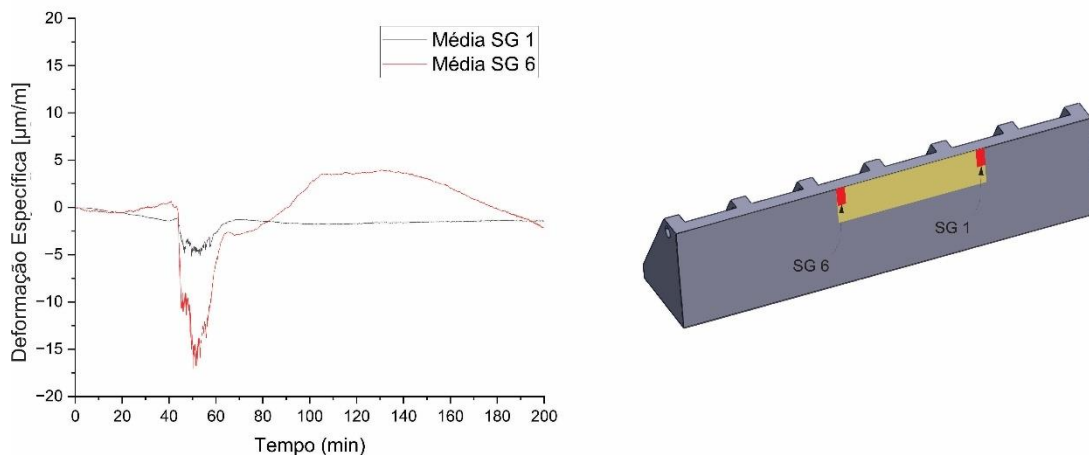


Figura 6. Ensaio de deformação específica na Montante Superior

A região Montante Superior tem sua importância por ser a região que ocorre as maiores deformações previstas pelo modelo numérico e nota-se que até o tempo de 44 minutos o concreto obteve um comportamento com variações nas deformações sem muita relevância, pressupõem que a influência da alteração da umidade não foi uma variável que afetou o sistema de coleta de dados e nota-se que a estrutura se manteve resistente aos esforços atuantes. A partir do tempo 44 minutos nota-se brusca deformação representando um deslocamento da estrutura antes de atingir a máxima tensão hidráulica bem mais acentuado no canal 6.

Para examinar a seção Jusante do modelo reduzido, foi empregada uma abordagem dupla. Primeiramente, a média do SG 2, formada pela média dos ensaios CCN 04, CCN 06 e CCN 07. Além disso, a média do SG 7 foi derivada dos dados dos ensaios CCN 04, CCN 06 e CCN 08. A média das deformações extraídas de cada um desses canais estão refletidas na Figura 7.

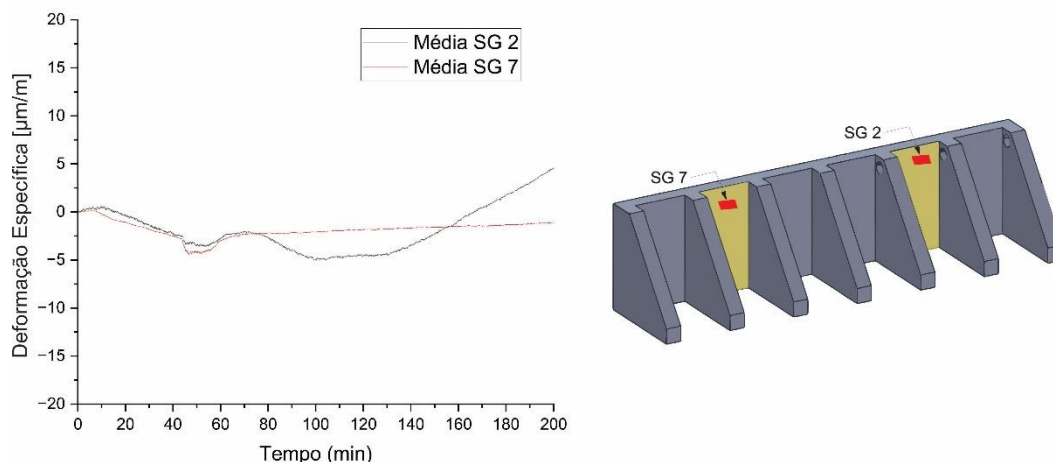


Figura 7. Média da deformação específica na Jusante

A região Jusante revela melhor o comportamento elástico do concreto até o tempo de 44 minutos tendo um padrão na declinação da deformação. A partir do tempo 44 minutos nota-se uma sutil deformação representando um pequeno deslocamento da estrutura antes de atingir a máxima tensão hidráulica.

Por fim, a análise da seção designada como Contraforte no modelo reduzido. Inicia-se calculando da média das medições provenientes do canal 5, consolidada a partir dos resultados dos ensaios 04, 06, e 07. Adicionalmente, incorporou-se a média calculada a partir do canal 8, com a utilização dos dados coletados nos ensaios 04, 06 e 08. As médias resultantes desses canais, que refletem as deformações registradas e o resultado dessa análise estão apresentadas por meio da Figura 8.

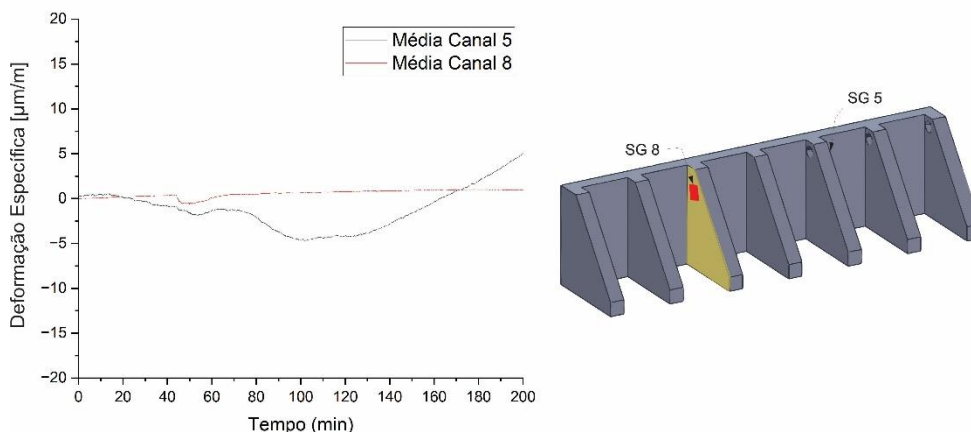


Figura 8. Média da deformação específica na Contraforte

A região Contraforte mostra um comportamento de deformação mais estável até o tempo de 44 minutos nota-se o mesmo padrão na declinação da deformação, de forma mais discreta se compararmos com as outras partes da estrutura.

4 CONCLUSÃO

Conclui-se, portanto, que o sistema de monitoramento com resistores demonstrou eficiência ao medir as deformações pontuais da barragem, permitindo o acompanhamento das deformações durante o enchimento do reservatório e a observação de sua acomodação e máxima deformação. No entanto, verificou-se que o sistema não foi eficiente para acompanhar as fases de galgamento e esvaziamento do reservatório. Diante das deformações observadas sob as condições de carga consideradas nas análises, é possível concluir também que a estrutura da barragem não sofreu deformações excessivas que comprometessem sua funcionalidade ou segurança. Recomenda-se, entretanto, a realização de um estudo da interação entre fundação e estrutura, visando mapear o comportamento das concentrações de tensões e deformações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aracayo, Luis Antonio Sucapuca. *Modelagem térmica de barragem de contraforte via ANSYS: caso de estudo do bloco E6 da Usina Hidrelétrica de Itaipu - UHI*. 2016. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2016.
- ASDSO, “Dams 101. Association of state dam safety officials”, Disponível em <www.damsafety.org/dams101>. Acesso em 10 jul. 2021.
- Brasil. Ministério da Integração Nacional. *Manual de Segurança e Inspeção de Barragens*. Brasília: MI, 2002.
- CBDB - Comitê Brasileiro de Barragens. *Guia Básico de Segurança de Barragens*. São Paulo: CBDB, 2001.
- ELETROBRÁS. *Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas*. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRÁS, 2003. 278 p.
- Hickmann, Tásia. *Análise de variação térmica sazonal em barragem de contrafortes com o uso de cálculo fracionário*. / Tásia Hickmann. – Curitiba, 2016.
- Pires, K. O., Beck, A. T., Bittencourt, T. N., Futai, M. M. *Análise de confiabilidade de barragem de concreto construída*. Rev. IBRACON Estrut. Mater. vol.12 no.3, São Paulo, 2019.
- Soares, Eduardo Campos. *Projeto estrutural de uma barragem de concreto com contraforte*. 2014. 86 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- Queiroz, Daniel, *An alarm system for pore pressure measurements in the foundation of concrete dams – a case study of Storfinnforsen buttress dam*. School of Architecture and the Built Environment Department of Civil and Architectural Engineering Division of Soil and Rock Mechanics, Stockholm, Sweden. 2018
- Valtersson, Dan, Johansson, Lukas. *Stability Analysis of Non-overflow Section of Concrete Gravity Dams*. Especialização em Engenharia de Minas e Geotécnica, Universidade de Lulea de Tecnologia, Naquim, China 2018.