



XXV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

4369
GGH/31

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

Grupo de Estudo de Geração Hidráulica-GGH

Segurança de barragens: integração da coleta de dados de auscultação ao modelo numérico estrutural da Usina de Foz do Chapecó

JOAO RODOLFO CORTES PIRES(1); TIAGO LUIS DUARTE FORTI(2); LUIS FERNANDO PEDROZO MELEGARI(3); PROF. DR. PAULO S. FRANCO BARBOSA(4); GUSTAVO ALCALA BATISTELA(2); Cortes(1);Simworx(2);CPFL(3);UNICAMP(4);

RESUMO

O processo de auscultação visando garantir a segurança de barragens é um assunto de grande importância pois os danos causados no caso de um acidente são severos e muitas vezes irreversíveis. O objetivo deste trabalho é propor um sistema de monitoramento em tempo real que permita detectar de forma antecipada possíveis anomalias na estrutura a tempo de se realizar manobras que evitem, ou pelo menos, minimize os impactos de um acidente. O sistema utilizará Estações Totais Robotizadas (RTS) de alta precisão para medir os deslocamentos da estrutura e compará-las com as deformações calculadas pelo método de Elementos Finitos.

PALAVRAS-CHAVE

Robotic Total Station, Método dos Elementos Finitos, Segurança de Barragem, Monitoramento em tempo real

1.0 - INTRODUÇÃO

A segurança de barragens e os processos de auscultação são assuntos de grande importância, pois embora de baixa probabilidade de ocorrência de acidentes, os danos causados em uma ruptura são de elevada magnitude, muitas vezes irreversíveis. A importância do tema pode ser caracterizada pelo menos em três dimensões: a regulatória, a técnica e a financeira. Na dimensão regulatória destaca-se a necessidade de observância à legislação, que no caso brasileiro ganhou maior nível de responsabilidade para os agentes proprietários a partir da publicação da Lei nº 12.334 de 20/09/2010 (Lei de Segurança das Barragens). Na dimensão técnica, o crescimento do número de barragens construídas e o envelhecimento das estruturas expostas aos fatores de risco (climáticos, geológicos) aumentam a probabilidade de ocorrência de acidentes. Na dimensão financeira ficam evidentes o potencial de prejuízos com reparos ambientais, recuperação de imagem da empresa e pagamento de multas.

A Figura 1 apresenta a metodologia para a integração dos dados coletados em tempo real pela RTS na Usina de Foz de Chapecó ao seu modelo numérico tridimensional com o objetivo do cálculo do seu estado de tensões pelo método dos elementos finitos, bem como a compatibilização com os dados já coletados por campanha. A metodologia proposta, além de agilizar o acionamento de alertas, permite maior sistematização de armazenamento dos dados coletados.



FIGURA 1: Metodologia para acionamento de alertas e ações

A Usina Hidrelétrica Foz do Chapecó, com potência instalada de 855 MW, está instalada no Rio Uruguai, entre os municípios de Águas de Chapecó, em Santa Catarina, e Alpestre, no Rio Grande do Sul. A estrutura de barramento da Usina de Foz do Chapecó é composta por um vertedouro, com estrutura em concreto armado contendo 15 vãos e capacidade total de escoamento de até 62.190 m³/s, uma barragem de enrocamento com núcleo asfáltico com 598 metros de extensão e 48 metros de altura, e uma barragem de fechamento em enrocamento com núcleo argiloso com 33 metros de altura e 200 metros de extensão.

O processo de monitoramento destas estruturas, conforme consta no manual de monitoramento (7) é realizado mensalmente, após primeiro ano de operação, com a coleta de dados de 51 piezômetros, 19 extensômetros de haste, 16 medidores de vazão, 6 medidores triortogonais de juntas, 4 tensômetros para concreto, 12 tensômetros para armadura, 13 termômetros para concreto, 18 marcos superficiais, 3 inclinômetros, 6 células de pressão e 12 medidores de recalque. Além das leituras dos instrumentos, ocorrem inspeções visuais das condições da estrutura.

A coleta em tempo real realizada pela RTS contará com 52 marcos superficiais, sendo 33 prismas na face de jusante na barragem principal, 16 nos vertedouros e 3 na barragem de fechamento, além de 4 prismas em marcos geodésicos fora da estrutura em análise para referenciamento do sistema.

2.0 - CÁLCULO ESTRUTURAL PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

O método dos elementos finitos pode ser definido como uma técnica sistemática de construção de soluções aproximadas de problemas de valor de contorno. A malha tridimensional é construída considerando-se os detalhes da estrutura, como galerias, juntas de dilatação, e posicionamento dos esforços da comporta utilizando-se o software Gmsh (1). O Gmsh conta com diversas configurações importantes para obtenção de uma malha de qualidade, como, por exemplo, a de maior refinamento em regiões de maior curvatura. Nas juntas de dilatação, elementos de interface permitem o deslizamento relativo dos blocos, mas mantendo o contato de compressão. A ações aplicadas a estrutura consistem de pressões estáticas devido as cargas hidráulicas e sub pressões devido a percolação na fundação. O sistema é implementado em linguagem C++, utilizando para a simulação o algoritmo clássico de espaços H¹ da biblioteca de elementos finitos PZ (2) para resolução do problema.

A estrutura é modelada em 3D (Figura 2) com base nas dimensões obtidas de arquivos digitais das plantas e cortes do projeto. O modelo completo inclui os vertedouros e a barragem principal.

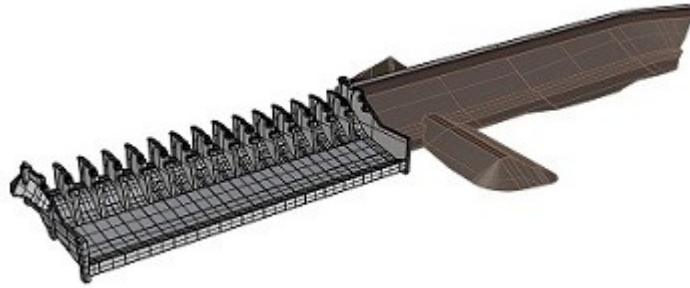


FIGURA 2: Modelo do vertedouro e barragem principal

2.1 Vertedouro

O modelo do vertedouro contempla a geometria externa e as galerias internas. A Figura 3 destaca dois blocos para visualização das galerias internas. Na simulação por elementos finitos utilizou-se o módulo de elasticidade de 21,8 GPa para o concreto e a malha composta de 12.650 tetraedros para os dois blocos mais a laje.

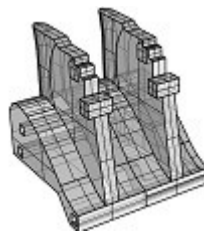


FIGURA 3: Geometria dos Blocos 4 e 5

O objetivo do projeto é simular toda a estrutura dos vertedouros e da barragem principal em uma mesma simulação. Entretanto, no estágio atual do projeto, foram realizadas simulações dos blocos 4 e 5 isoladamente. A Figura 4 mostra o deslocamento desses blocos para um nível de reservatório de 265 metros com as comportas fechadas e para o nível de reservatório de 259 metros.

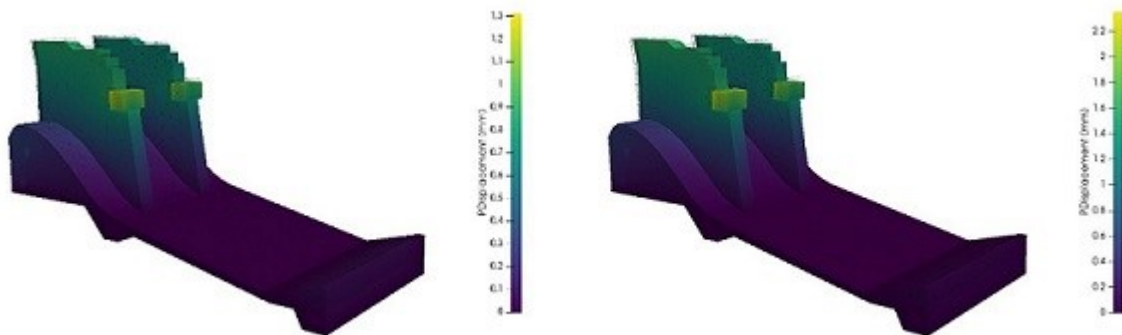


FIGURA 4: Deslocamento dos blocos 4 e 5 para nível de reservatório: (a) de 259 metros (esquerda) e (b) de 265 metros (direita).

Para calibração do modelo elementos finitos dos vertedouros utilizou-se informações de projeto da estrutura e a análise dos dados históricos de monitoramento. Para avaliação da ordem de grandeza da medição de deslocamentos utilizou-se os dados de medição do marco superficial VT-MS-05 (Figura 5), que se encontra nos vertedouros centrais da estrutura. Na análise dos dados monitorados pela construtora durante o período de construção e comissionamento (30/03/2010 a 28/10/2010), e posteriormente (06/03/2013 a 15/03/2016) pela equipe de operação da usina percebe-se que ocorreu um deslocamento a jusante de aproximadamente 50 mm e que se encontra estabilizado durante a operação.

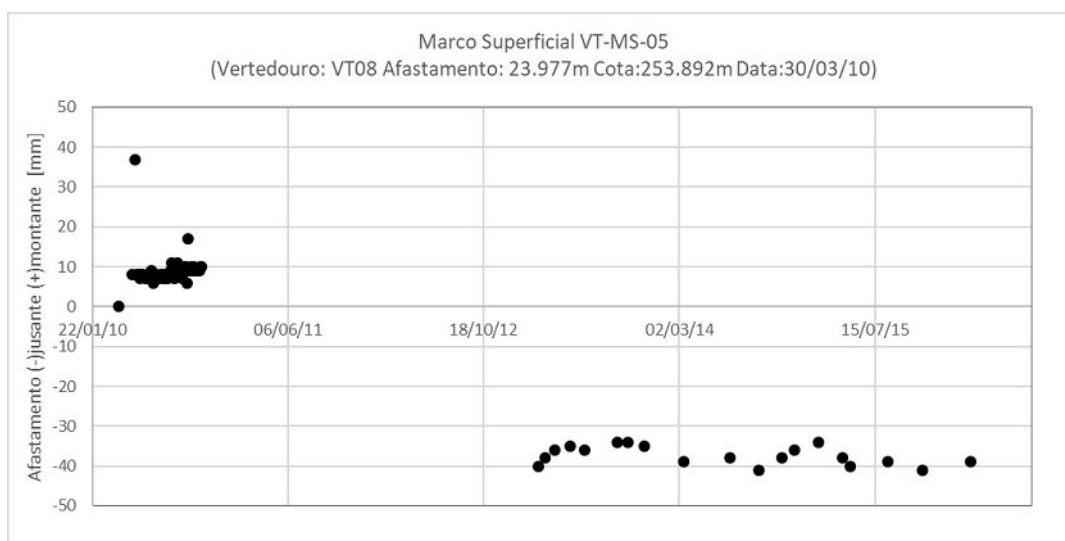


FIGURA 5: Deslocamento do marco superficial VT-MS-05 no Vertedouro

Este deslocamento pode ter ocorrido devido a acomodações da estrutura ou mesmo ser devido a diferença nas leituras em períodos e com equipes distintas. Já as variações durante o período de operação, que são os valores de maior interesse para o sistema de monitoramento, não passam de 10mm. Dado que pelo modelo de elementos finitos a variação de 6 metros no enchimento do reservatório apresentou uma variação de aproximadamente 1 mm, pode-se estimar, para o presente caso de simulação, que do total de variação captada pelo sistema de monitoramento em tempo real, a componente devida ao deslocamento estrutural poderá chegar a 10% do total.

2.2 Barragem principal

A barragem principal é de enrocamento com núcleo asfáltico e possui borda livre de 3,4m e largura de coroamento com 7 m de largura e coroamento na cota 268,93m O comprimento da barragem é de 548 m (crista), a altura média é de 48 m e o volume total com as enscadeiras incorporadas é de 1.800.00 m³. Segundo Herweg (3), o núcleo da barragem é composto de CBUQ com mastique produzido no traço 1:1:3, com cimento asfáltico de petróleo 85-100, filler calcário e agregado de até 3mm. Como material fino foi utilizado o filler calcário, representando 30% em peso do total. A Tabela 1 e a Figura 6, ambas extraídas do ESTUDOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES do projeto da barragem (5), apresentam, respectivamente os valores dos parâmetros dos materiais considerados para os zoneamentos da seção tipo da barragem principal, e o desenho da seção tipo.

TABELA 1. Dados de projeto utilizados na barragem principal

	Material	γ_{unsat} kN/m³	γ_{sat} kN/m³	ν	E kN/m²
Linear-elástico	Transição Fina	22	22	0,2	100.000
	Transição Grossa	22	22	0,2	100.000
	Enrocamento fino	19	19	0,25	50.000
	Enrocamento grosso - montante	21	21	0,25	35.000
	Enrocamento grosso - jusante	21	21	0,25	35.000
	Enrocamento Lançado	19	19	0,25	30.000
	Núcleo Asfáltico	22	22	0,49	80.000/40.00
	Basalto	27	27	0,15	10.000.000

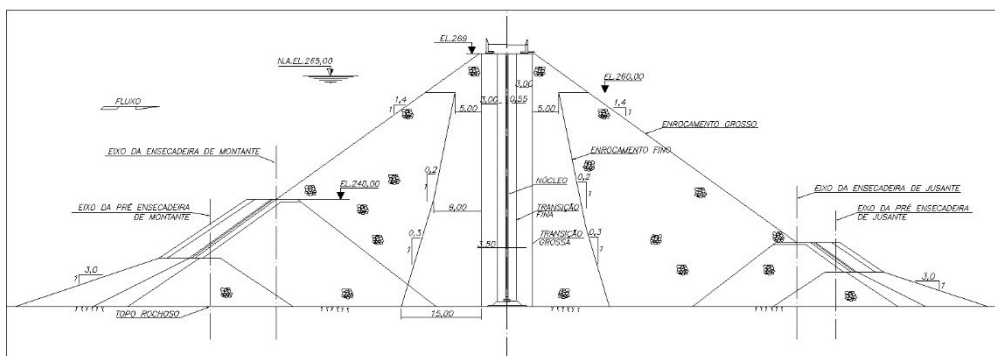


FIGURA 6: Zoneamento da seção tipo da barragem principal de foz do Chapecó

Para a análise dos dados de projetos com os dados históricos optou-se por analisar o inclinômetro e marcos superficiais localizados na região central da barragem principal. Comparando-se o deslocamento do inclinômetro IN-D com os valores teóricos da deformação transversal ao eixo da barragem para o enchimento a cota de 265m, verificamos que os valores se encontram próximos dos limites na base da barragem, mas bem menores com o aumento da cota, conforme pode ser visto na Figura 7.

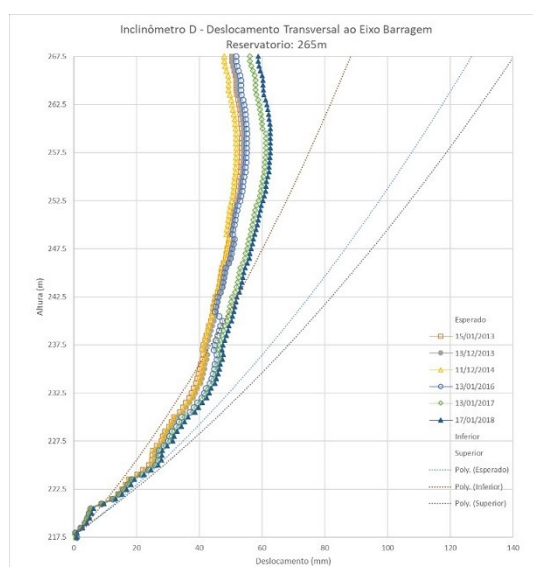


FIGURA 7: Deformações anuais do Inclinômetro IN-D e limites inferiores, esperado e superior das deformações

Analisando-se os dados de medição do marco superficial BP-MS-D09, que podem ser vistos na Figura 8, realizados pela construtora durante o período de construção e comissionamento entre (03/05/2010 a 05/01/2011), e posteriormente (01/03/2013 a 21/09/2018) pela equipe de operação da usina, percebe-se que ocorreu um deslocamento a jusante de aproximadamente 175 mm, da mesma forma que no caso da análise do vertedouro o deslocamento pode ter ocorrido por assentamento da estrutura durante o enchimento ou mesmo por diferença numérica da medição em períodos distintos. Já os deslocamentos ocorridos durante o período de operação apresentaram variação anual média de, aproximadamente, 5mm por ano, o que representa menos de 0,01% da variação da altura da usina. Segundo SZOSTAK-CHRZANOWSKI, A (12) considera-se aceitável como estável até 0,02% ao ano, conforme o caso do projeto da barragem oeste do Diamond Valley Lake (DVL) na Califórnia.

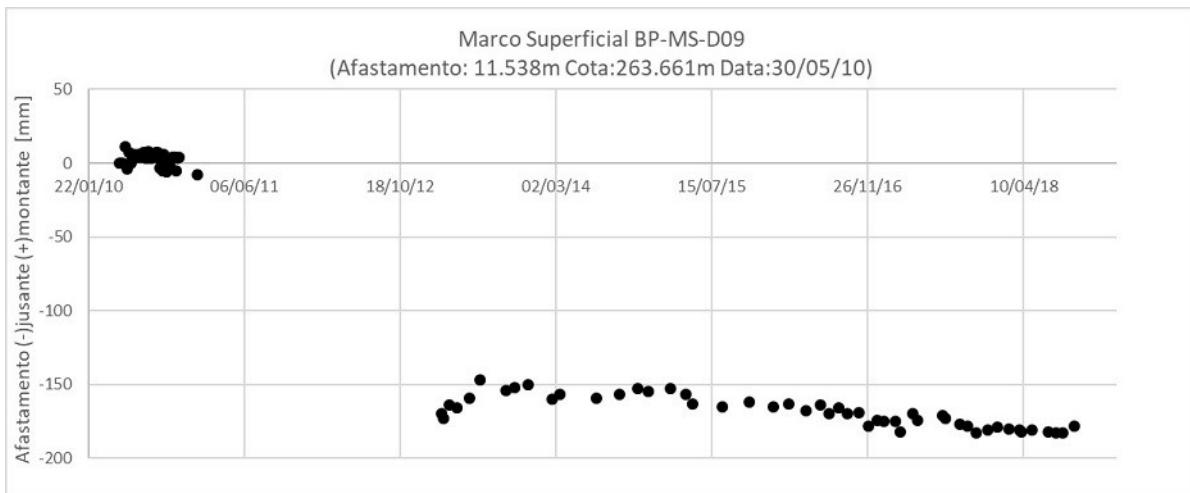


FIGURA 8: Deslocamento do marco superficial BP-MS-D09

Se analisarmos o ESTUDOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES do projeto da barragem (5) vê-se que a deformação esperada era de 125mm, que embora seja menor que o medido no marco BP-MS-D09, é próximo quando comparado com casos apresentados em SZOSTAK-CHRZANOWSKI, A (11), e Pereira, F. A. (4)

3.0 - SISTEMA DE MONITORAMENTO ATRAVÉS DE RTS

O sistema de monitoramento em tempo real conta com uma Estação Total Robotizada (RTS - Robotic Total Station) de alta precisão com finalidade específica de monitoramento, que está preparada para operar 24 horas por dia, 7 dias por semana. O sistema inclui cabine climatizada com sensores de pressão e temperatura para correção de medições, com pilares de centragem forçada para a RTS e para os 4 prismas de referenciamento do sistema, além dos 52 prismas fixos na estrutura monitorada.

A instalação deste sistema, permite de imediato dois grandes benefícios para o monitoramento da estrutura: i) aumento da exatidão, uma vez que a RTS é mais precisa, e operada sem intervenção humana; e ii) permite que qualquer alteração seja identificada em tempo real a tempo de se tomar ações preventivas ou de mitigação.

Os dois modelos analisados para o sistema de monitoramento foram o Trimble S9 (9) e a Leica TM50 (8). Ambas RTS apresentam precisão angular de 0,5", sendo que a TM50 tem uma ligeira vantagem na precisão linear que é de 0,6mm + 1ppm contra 0,8mm + 1 ppm da S9.

Os dois modelos apresentam uma precisão significativamente superior quando comparado com o modelo indicado no manual de monitoramento que é de 2" e 2,0+1ppm. Para comparar a precisão das duas RTS com a estação total avaliou-se a propagação do erro devido a precisão de medição angular e linear para a situação de projeto de instalação da RTS e dos prismas.

Uma RTS calcula a posição de um ponto a partir da informação da distância "L" entre ela e o refletor no ponto de medição, e os ângulos de deslocamento da mira do laser em relação a vertical e a horizontal. Os erros que estão embutidos nestas medições são devidos a componente angular e devido a componente linear da distância. Considerando que as coordenadas de um ponto são definidas conforme o esquema da Figura 9 abaixo, serão feitas as propagações do erro para as componentes decompostas nos eixos cartesianos.

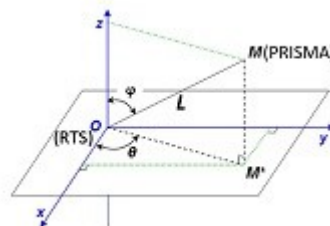


FIGURA 9. Conversão coordenada polar para coordenadas cartesianas

As coordenadas cartesianas do ponto M será dada pelas equações Eq.01, Eq.02, e Eq.03:

$$Lx = L \cos \theta \sin \varphi \quad (\text{Eq.01})$$

$$Ly = L \sin \theta \sin \varphi \quad (\text{Eq.02})$$

$$Lz = L \cos \varphi \quad (\text{Eq.03})$$

Considerando que as medições de L, θ e φ são independentes, e que o erro absoluto seja dado de forma genérica pela expansão de 1º ordem da série de Taylor, representado na equação Eq.04,

$$|\Delta X| = \left| \frac{\partial f}{\partial A} \right| |\Delta A| + \left| \frac{\partial f}{\partial B} \right| |\Delta B| + \left| \frac{\partial f}{\partial C} \right| |\Delta C| + \dots \quad (\text{Eq. 04})$$

Pode-se considerar que o erro para a componente “Lx”, “Ly” e “Lz”, são dados, respectivamente, pelas equações Eq.05, Eq.06, e Eq.07:

$$|\Delta L_x| = |\cos \theta \sin \phi| |\Delta L| + |-\sin \theta \sin \phi| |\Delta \theta| + |\cos \theta \cos \phi| |\Delta \phi| \quad (\text{Eq.05})$$

$$|\Delta L_y| = |\cos \theta \sin \phi| |\Delta L| + |\cos \theta \sin \phi| |\Delta \theta| + |\sin \theta \cos \phi| |\Delta \phi| \quad (\text{Eq.06})$$

$$|\Delta L_z| = |\cos \phi| |\Delta L| + |-\sin \phi| |\Delta \phi| \quad (\text{Eq.07})$$

Para análise da precisão da RTS, no caso das estruturas da Usina de Foz do Chapecó, selecionou-se 4 pontos de monitoramento, sendo dois na barragem principal, um no vertedouro VT-08, e outro na barragem de fechamento. Os pontos dos prismas bem como a localização da RTS podem ser vistos na Figura.10.

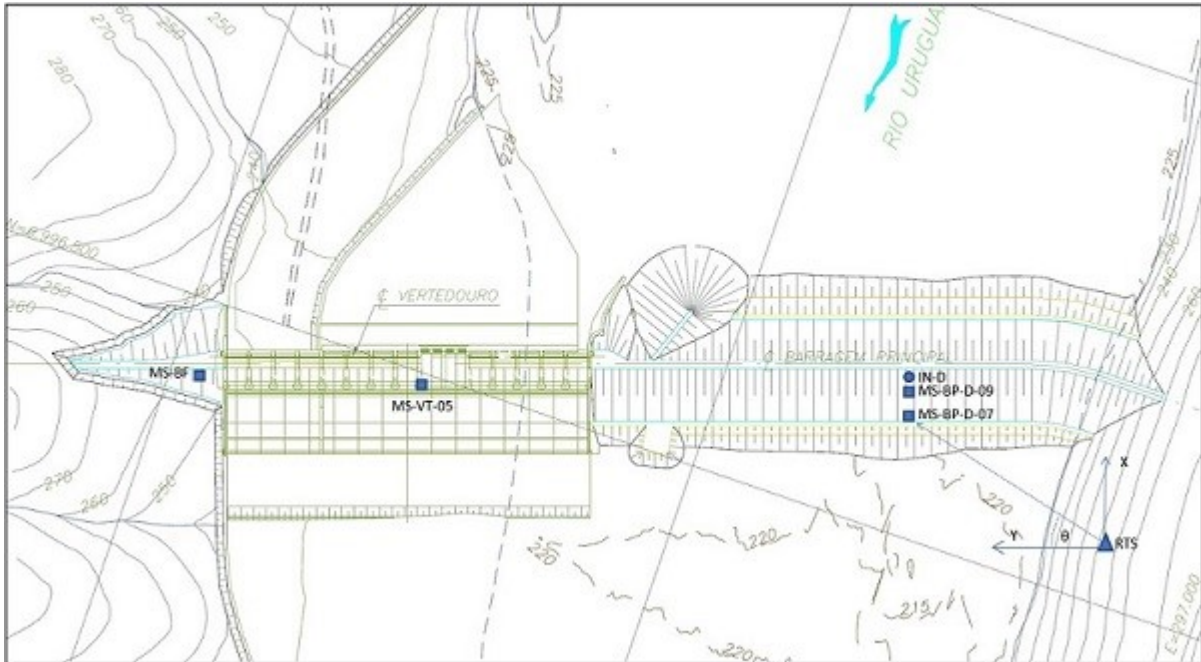


FIGURA 10. Posicionamento da RTS e dos prismas no vertedouro, barragem principal e de fechamento.

As coordenadas dos pontos dos marcos superficiais de estudo podem ser vistas na Tabela 2 logo abaixo.

TABELA 2. Posicionamento dos pontos estudados no vertedouro, barragem principal e de fechamento.

Ponto	Cota (m)	ESTACA	Afastamento (m)	ΔX	ΔY	θ (deg)	ϕ (deg)
MS-BP-D-09	263.545	E40+19,737m	11.708	228.292	148.292	33.006609	89.2539249
MS-BP-D-07	256.469	E41+00,189m	21.118	219.811	138.882	32.285705	90.7780436
MS-VT-05	253.483	E18+12,106m	24.017	667.894	135.983	11.508108	90.5478097
MS-BF	268.209	E08+18.785m	6.667	861.215	153.333	10.095308	89.4623347
RTS	260.000	E48+80.000m	160.000	-	-	-	-

Utilizando-se as equações Eq05, Eq.06 e Eq.07 para cálculos dos erros dos pontos de estudo, montou-se a Tabela3, que pode ser visto abaixo, com os erros para as três coordenadas para as RTS TM50 e S9, além da especificada no documento (6).

TABELA 3. Erro de medição dos pontos estudados no vertedouro, barragem principal e de fechamento.

Ponto	ΔX (m)	ΔY (m)	ΔZ (m)	Leica TM50 (0.5"e 0.6mm +1 ppm)			Trimble S9 (0.5"e 0.8mm +1 ppm)			Campanha (2"e 2.0mm +1 ppm)		
				$\sigma \Delta X$ (mm)	$\sigma \Delta Y$ (mm)	$\sigma \Delta Z$ (mm)	$\sigma \Delta X$ (mm)	$\sigma \Delta Y$ (mm)	$\sigma \Delta Z$ (mm)	$\sigma \Delta X$ (mm)	$\sigma \Delta Y$ (mm)	$\sigma \Delta Z$ (mm)
MS-BP-D-09	228.292	148.292	3.545	1.098	1.033	0.671	1.266	1.142	0.674	3.372	3.470	3.550
MS-BP-D-07	219.811	138.882	-3.531	1.071	0.997	0.642	1.240	1.104	0.645	3.286	3.357	2.552
MS-VT-05	667.894	135.983	-6.517	1.601	1.878	1.664	1.797	1.918	1.666	4.008	7.024	6.635
MS-BF	861.215	153.333	8.209	1.843	2.350	2.134	2.040	2.385	2.136	4.395	8.868	8.509

4.0 - CONCLUSÃO

A implantação de uma metodologia de monitoramento em tempo real permite efetivamente detectar

deslocamentos não perceptíveis com muito mais antecedência do que no caso apenas das medições por campanha. Além disto, a utilização de equipamentos de alta precisão, sem interferência humana e com a utilização de métodos de elementos finitos para cálculo de deslocamento esperado, permite uma acurácia muito maior na identificação de deslocamentos não esperados.

A precisão da RTS é sensível principalmente a seu erro angular e a parcela variável do erro linear. Para distâncias acima de 500 m estimam-se erros até 75% menores para uma estação de 0,5" de precisão angular quando comparado a uma estação convencional de precisão angular de 1,5" ou 2,0". O erro fixo da parcela linear, embora chegue a mais de 10% para distâncias de aproximadamente 200m, se torna irrelevante para distâncias próximas a 500m, ficando predominante a parcela variável do erro linear.

Os erros devido a variação de pressão e de temperatura devem ser corrigidos, com a inclusão de sensores de pressão e temperatura. A variação devido a reflexão do feixe no vidro da cabine passa ser de menor relevância uma vez que ele sempre incidirá na mesma inclinação mantendo, sempre, o mesmo desvio para o mesmo ponto. Já a pureza do vidro é importante para minimizar a inclusão ruídos nas medições.

No caso das estruturas monitoradas na usina de Foz do Chapecó, a RTS foi posicionada na margem esquerda, com visada para Barragem Principal, Crista dos Vertedouros e crista da Barragem de fechamento. A distância máxima de medição é de 861 m, o que garante um erro máximo 2,4 mm. Este erro também pode ser minimizado considerando um aumento das amostragens, como obtenção de medias moveis de 10 ciclos, por exemplo.

A utilização do cálculo estrutural através da utilização do modelo de elementos finitos permite ainda separar do deslocamento medido a parcela esperada do deslocamento, que pela análise feita para este estudo, pode chegar até 10% do deslocamento no caso do vertedouro.

Portanto, a implantação deste sistema aumenta consideravelmente a segurança de operação da barragem, uma vez que aumenta a acurácia das informações e reduz sensivelmente o prazo de identificação dos deslocamentos não esperados.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Geuzaine, C., Remacle, J.F. Gmsh: A 3-D Finite Element Mesh Generator with Built-in Pre- and Post Processing Facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering, n. 79, pp. 1309 – 1331, 2009.

(2) Devloo, P. R. B. PZ: An object oriented environment for scientific programming. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, v. 150, pp. 133-153, 1997.

(3) Herweg, C., Cortez, C., Santos, M.M. Barragem de Enrocamento com Núcleo de Asfalto na UHE Foz do Chapecó, GEOSUL 2012, Porto Alegre, 26 a 28 de abril de 2012

(4) Pereira, F. A. ANÁLISE NUMÉRICA DE UMA BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO ASFÁLTICO, Tese de Mestrado, UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO UENF - CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ, NOVEMBRO – 2010

(5) UHE FOZ DO CHAPECÓ - ESTUDOS DE TENSÕES E DEFORMAÇÕES DA BARRAGEM DE ENROCAMENTO COM NÚCLEO ASFÁLTICO – MEMÓRIA DE CÁLCULO- HFC-MC2P-BPC02-2003 – 05/03/2010

(6) UHE FOZ DO CHAPECÓ - BARRAGEM PRINCIPAL E DE FECHAMENTO ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA DA INSTRUMENTAÇÃO - HFC-ET2P-BPC31-2001- 10/03/10

(7) UHE FOZ DO CHAPECÓ BARRAGEM PRINCIPAL E DE FECHAMENTO MANUAL DE MONITORAMENTO E INSPEÇÕES VISUAIS - HFC-MO2P-BPC31-2001 – 22/02/10

(8) Leica Nova TM 50, Especificação técnica; Leica Geosystems AG; Heerbrugg, Suíça; www.leica-geosystems.com

(9) Trimble S9/ S9 HP Total Station; Trimble Inc., 10368 Westmoor Dr, Westminster CO 80021, USA

(10) Michael A. Duffy, M.A., Hill, C., and Whitaker, C; Chrzanowski, A., Lutes, J.; and Bastin, G. AN AUTOMATED AND INTEGRATED MONITORING PROGRAM FOR DIAMOND VALLEY LAKE IN CALIFORNIA, Paper presented at: 10th FIG Intl. Symp. On Deformation Measurements, Orange, CA, March 19-22, 2001

(11) SZOSTAK CHRZANOWSKI, A; DENG,N; and MASSIÉRA, M; MONITORING AND DEFORMATION ASPECTS OF LARGE CONCRETE FACE ROCKFILL DAMS; 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and Analysis/4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Lisboa, 12 a 15 de maio de 2008.

(12) SZOSTAK-CHRZANOWSKI, A., CHRZANOWSKI, A., MASSIÉRA, M., BAZANOWSKI, M., and WHITAKER, C., STUDY OF A LONG-TERM BEHAVIOR OF LARGE EARTH DAM COMBINING MONITORING AND FINITE ELEMENT ANALYSIS RESULTS; 13th FIG International Symposium on Deformation Measurements and

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



João Rodolfo Côrtes Pires é Engenheiro Civil graduado pela Universidade Estadual de Campinas (2001). Obteve os títulos de Mestre em Ciência e Doutor em Ciência em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, respectivamente nos anos de 2003 e 2011. Atuou como pesquisador colaborador no Departamento de Recursos Hídricos da Faculdade de Engenharia Civil da Unicamp entre os anos de 2013 e 2015. É sócio diretor da empresa Côrtes Consultoria. Atua nas áreas de engenharia, otimização, modelagem matemática, e avaliação de empreendimentos.



Luis Fernando Pedrozo Melegari é Engenheiro Civil graduado pela Universidade Federal de Santa Catarina (1995). Atualmente está cursando Pós-Graduação em Engenharia Civil na Universidade Estadual de Campinas. Tem experiência na operação e manutenção de estruturas civis em usinas hidrelétricas, com ênfase em obras de Terra e Enrocamento e estruturas de concreto. Trabalha como Gerente de Segurança de Barragens na CPFL Geração, que totaliza em seus ativos 48 PCHs e 08 UHEs - UHE Barra Grande, UHE Campos Novos, UHE Foz do Chapecó, UHE Serra da Mesa, Complexo CERAN e UHE Lajeado.



Paulo S. F. Barbosa é professor titular aposentado da Unicamp, e pesquisador colaborador do NIFE-Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp. Realizou pós-doutorado na área de planejamento de energia elétrica no Depto. de Pesquisa Operacional e Eng. Financeira na Universidade de Princeton, EUA (1999-2001) e na Escola de Eng. e Ciências Aplicadas da Universidade de Harvard (2010). Desde 1990 vem desenvolvendo pesquisa aplicada e capacitação na área de energia, para entidades e empresas públicas (Ministério de Minas e Energia; ANEEL, Operador Nacional do Sistema Interligado-ONS; CESP; CEMIG; Petrobrás) e empresas privadas (Duke Energy International, AES-Tietê; Cia Paulista de Força e Luz; Elektro, Eletropaulo, dentre outras). É assessor científico de diversas agências de fomento à pesquisa, tais como o CNPq, a CAPES, FINEP e a FAPESP.



Tiago Luis Duarte Forti possui graduação (2002) e doutorado (2010) em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente é sócio-diretor da Simworx Eng. P&D atuando como coordenador de engenharia e desenvolvimento. Tem experiência em simulação numérica, desenvolvendo aplicações de engenharia, nas áreas de engenharia de petróleo e estruturas. Publicações recentes: 1) TLD FORTI, NCS FORTI, FLG SANTOS, MA CARNIO. "The continuous-discontinuous Galerkin method applied to crack propagation". Computers and Concrete, Volume 23, Number 4, pages 235-243, 2019. 2) TLD FORTI, AM FARIAS, PRB DEVLOO, SM GOMES. "A comparative numerical study of different finite element formulations for 2D model elliptic problems: Continuous and discontinuous Galerkin, mixed and hybrid methods". Finite Elements in Analysis and Design, v. 115, p. 9-20, 2016.



Gustavo A. Batistela possui graduação (2018) em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas com período sanduíche na Universidade de Cardiff, País de Gales. Atualmente é pesquisador na Simworx Eng. P&D, dedicando-se a modelagem estrutural de barragens.