

# Cracking due to alkali-silica reaction in slab at the Jaguari hydroelectric power plant – a qualitative study

## Estudio cualitativo sobre fisuración debida a la reacción álcali – sílice en el forjado de la represa hidráulica de Jaguari

Jorge Luís Akasaki\*, Camila Sancowich Zoilo\*, Cesar Fabiano Fioriti<sup>1</sup>\*, Adriana Maria Pereira\*, Haroldo de Mayo Bernardes\*, Flávio Moreira Salles\*

\* Universidad Estadual Paulista (UNESP), Alameda Bahia, Ilha Solteira, São Paulo, BRASIL

Fecha de Recepción: 14/10/2013

Fecha de Aceptación: 25/11/2013

PAG 182 - 191

### Abstract

The concrete structures of Jaguari Hydro Power Plant (HPP) display cracks due to the occurrence of Alkali-Silica Reaction (ASR). The qualitative analysis of the cracks that occur in the slab of the water intake structure was performed through in-loco visual mapping, and through results from the computational analysis, using the finite element method. The cracks were mapped using the plastic film technique with ink pens. The computational analysis was performed with a commercial program using bidimensional elastic elements, CSQ – Constant Strain Quad. The comparison of the results with the two techniques showed that the most intense cracking observed in certain regions of the slab coincides with the occurrence of the maximum tensions when an expansion in the walls of the intake is simulated, which can explain the origin of the cracks observed in the slab.

Keywords: Alkali-aggregate reaction, computational analysis of structures, dam monitoring, concrete, slab

### Resumen

Las estructuras de hormigón de la Presa Hidráulica de Jaguari (PH) presentan una imagen de agrietamiento debido a la aparición de la Reacción Álcali-Sílice (RAS). En el presente trabajo se realizó un análisis cualitativo de las grietas que se producen en la losa por la entrada de agua con un estudio visual in situ, y los resultados de análisis por ordenador usando el método de elementos finitos. Para el estudio de las grietas se utilizó la técnica de registro con bolígrafos de plástico con tinta. El análisis computacional se realizó con el programa comercial de dos dimensiones de tipo elástico CSQ - Constant Strain Quad. Una comparación entre los resultados obtenidos con ambas técnicas mostró que el agrietamiento más intenso observado en ciertas regiones de la losa coincide con la aparición de los picos de tensión cuando se simula un taco de expansión en las paredes en contacto con el agua, lo que puede explicar el origen de fisuración observada en la losa.

Palabras Clave: Reacción álcali-agregado, análisis computacional de las estructuras, la vigilancia de las presas, hormigón, losa

## 1. Introducción

La planta de la represa hidráulica de Jaguari se encuentra ubicada en el Río del mismo nombre, cuyo borde derecho pertenece a la municipalidad de Jacarei, y su borde izquierdo a São José do Campos, Estado de São Paulo en Brasil. La última maquinaria instalada en la planta data del año 1973. La electricidad generada por la represa hidráulica es producida por dos turbinas tipo Francis, con una capacidad instalada de 27,6 MW. El embalse cubre 56 km<sup>2</sup> y su principal función es regularizar el flujo del Río Paraíba do Sul, que provee de agua a las ciudades del Valle de Paraíba, en el Estado de São Paulo, y a las ciudades del Estado de Rio de Janeiro. La entrada de agua de la represa de energía hidráulica está constituida por una estructura tipo torre, con un muro de contención de 63 m de altura. El agua llega hasta la central eléctrica, a través de un túnel abductor, con un valor referencial de caída de 49,9 m (CESP, 2013). La Figura 1 muestra una vista aérea de la represa hidráulica y de sus estructuras.

## 1. Introduction

The UHE Jaguari plant is located in the Jaguari River, with the right margin belonging to the municipality of Jacarei and the left margin to São José dos Campos, State of São Paulo, Brazil. The last machinery equipment installed at the plant was in 1973. The power plant's electricity is generated by two Francis-type turbines with an installed capacity of 27.6 MW. The reservoir stretches over 56 km<sup>2</sup> and its main purpose is to regularize the flow of the River Paraíba do Sul, which supplies water to the cities in the Paraíba Valley in State of São Paulo and to the cities in the state of Rio de Janeiro. The power plant's water intake is a tower type structure with buttresses of 63m in height. The water reaches the power house through an abductor tunnel with drop reference value of 49.9 m (CESP, 2013). Figure 1 shows an aerial view of UHE Jaguari and its structures.

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: fioriti@fct.unesp.br





**Figura 1.** Represa Hidráulica de Jaguarí (PH). Fuente: CESP (2013)

**Figure 1.** UHE Jaguarí. Source: CESP (2013)

Deterioro y daño estructural observados en la planta en el año 1980, que se relacionan con la aparición de la Reacción Álcali-Agregado (RAA).

La RAA es una reacción química en el concreto, entre ciertos tipos de agregados e iones álcalis e hidroxilos, predominando en el concreto empleado en la mezcla reactiva, cuyo resultado es la formación de productos con características higroscópicas y expansivas en la masa del concreto. Este producto se conoce popularmente como reacción de gel de sílice.

La aparición de la Reacción Álcali-Agregado requiere de la presencia simultánea de tres factores esenciales: agregado reactivo, cemento con un suficientemente alto contenido de material alcalino ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ) y disponibilidad de humedad. La velocidad y magnitud de la expansión depende de la temperatura, área de la superficie específica del material, de la presión de confinamiento y de la contribución del material alcalino exterior (Priszkulnik, 2005).

Según Lu et al. (2006), además del contenido alcalino en el cemento, los altos niveles de material alcalino son provistos por los agregados, especialmente por aquellos ricos en feldespato; por lo que la contribución del material alcalino proveniente de los agregados reactivos debe ser tomada muy en cuenta, especialmente en aquellas estructuras de concreto susceptibles a la presencia de RAA.

Según Fournier et al. (2005), el proceso químico de la RAA puede ser clasificado dentro de tres clases, dependiendo del tipo y mineralogía del agregado reactivo. Estas son: reacción álcali-sílice, reacción álcali-silicato y reacción álcali-carbonato, siendo la RAS la más forma más característica de la RAA, a nivel mundial.

El gel producido por la reacción química es responsable de la expansión y deterioro del concreto. El gel absorbe agua y se expande. Cuando el gel excede el contenido de vacíos del concreto provoca presiones intersticiales, que producen esfuerzos de tracción cuando se encuentra en contacto con los poros de las paredes. Por lo tanto, se producen micro fracturas en el agregado y en la pasta de cemento, conduciendo así al deterioro del concreto.

*Structural deterioration and damages were observed in the plant in 1980, which were related to Alkali-Aggregate Reaction (AAR) occurrences.*

*AAR is a chemical reaction in concrete between certain types of aggregates and hydroxyl and alkali ions, predominantly in the cement used in the reactive mixture and the result is the formation of products with hygroscopic and expansive characteristics located in the concrete mass. This product is popularly known as gel reaction.*

*The occurrence of ARR requires the simultaneous occurrence of three essential factors: reactive aggregate, cement with sufficiently high alkali content ( $K_2O$ ,  $Na_2O$ ), and moisture availability. The velocity and magnitude of expansions depend on temperature, specific surface area of the material, the confining stresses and the contribution of external alkalis (Priszkulnik, 2005).*

*According to Lu et al. (2006), in addition to the alkali content in cement, high alkali levels are provided by aggregates, especially those rich in feldspar, thus in concrete structures susceptible to the occurrence of AAR, the alkali contribution from the reactive aggregates should be taken into consideration.*

*According to Fournier et al. (2005), the chemical process of AAR can be classified into three types, depending on the type and mineralogy of the reactive aggregate, such as alkali-silica reaction, alkali-silicate reaction and alkali-carbonate reaction – with ASR as the most commonly recognized form of AAR worldwide.*

*The gel produced by the chemical reaction is responsible for the expansion and deterioration of concrete. The gel absorbs water and swells, and when it exceeds the concrete void content it causes interstitial pressures that induce tensile stresses when in contact with the pore walls. Therefore, micro fractures occur in the aggregates and around the cement paste, leading to the deterioration of concrete.*

Las principales apariciones de RAA, reconocidas como síntomas característicos de esta reacción son: deformaciones, desplazamientos, grietas, decoloración de la superficie del concreto y exudaciones de gel. Según Mehta y Monteiro (2008), las grietas en el concreto no reforzado, provocadas por RAA, lucen como un mapa; y en el concreto reforzado las grietas se producen en paralelo a la dirección del refuerzo.

Las consecuencias de las RAA pueden variar las propiedades mecánicas del concreto y las condiciones de funcionalidad de varias estructuras afectadas por este tipo de daño, tales como puentes, edificios, rerepresas, plataformas, entre otros; en cuanto todas las condiciones para desarrollar la reacción se encuentren presentes.

Según Fournier y Bérubé (2000) las grandes estructuras de concreto, afectadas por las RAS, raramente son demolidas y/o reconstruidas, pero existen informes sobre estructuras y partes de las estructuras que son reemplazadas, debido a razones de funcionalidad y seguridad.

Desde la década de los 60, el CESP ha estado constantemente atento a la aparición de RAA en la construcción de sus proyectos, realizando estudios detallados sobre la reacción y sobre métodos de mitigación, apoyado con consultores extranjeros, para llevar a cabo la construcción de la represa hidráulica de Jupíá, la de Ilha Solteira, y también en trabajos posteriores. Se cree que la reacción ocurrida en la represa hidráulica de Jaguari, se debe a una falla de los métodos de investigación relacionados con los potenciales agregados reactivos.

Las inspecciones realizadas en la estructura de entrada de agua de la represa hidráulica (PH) de Jaguari, junto con los informes de los operadores de la planta sobre problemas operacionales y la observación de casos de estudios en otras estructuras, condujeron a la implementación de un amplio sistema de monitoreo en la entrada de agua de la PH. Éste incluyó la observación del movimiento relativo de los muros y muros de contención, además de los parámetros para indicar la tasa potencial de la expansión del concreto y el avance gradual del fenómeno y anomalías resultantes.

Existen numerosos factores que influyen en el desarrollo de la RAA y en la magnitud de sus expansiones. Dado el desconocimiento sobre el comportamiento real exhibido por las estructuras afectadas por la RAA, es necesario contar con detallada información sobre los movimientos estructurales para ejecutar programas de monitoreo, que principalmente son: inspecciones visuales periódicas, instrumentación adicional para cuantificar los desplazamientos de las grietas, juntas y la estructura completa; determinar la tasa de expansión del concreto y desarrollar modelos matemáticos tridimensionales de las expansiones estructurales, para estimar el principal y potencial daño, y, por consiguiente, asegurar que se realicen intervenciones en forma anticipada. Se puede interpretar los resultados de la instrumentación estableciendo modelos y criterios para explicar el comportamiento estructural de la rerepresa. Al comprender el desarrollo de las extensiones, se puede emitir recomendaciones sobre las condiciones de seguridad de la estructura y determinar cómo verificar la necesidad de establecer trabajos de mitigación o medidas de prevención.

Existe un sin número de modelos matemáticos que intentan representar las expansiones causadas por la RAA. Para validar el modelo, se deberían emplear técnicas de monitoreo, a modo de comparación y control.

*The main occurrences of AAR, regarded as characteristic reaction symptoms, are: deformations and displacements, cracking, concrete surface discoloration and gel exudations. According to Mehta and Monteiro (2008), in unreinforced concrete the cracks caused by ARR resemble a "map" pattern, and in reinforced concrete the cracks occur parallel to the reinforcement direction.*

*The consequences of ARR occurrences can change the mechanical properties of concrete and the functionality conditions of various structures that are affected by the damage, such as bridges, buildings, dams, decks, among others, provided all the conditions to develop the reaction are in place.*

*According to Fournier and Bérubé (2000), large concrete structures affected by ASR are rarely demolished and/or reconstructed but there are reports of structures and structural parts that are replaced due to functionality and security reasons.*

*CESP has always been attentive to the occurrence of ARR in the construction of its projects since the 1960s, when detailed studies of the reaction and mitigation methods, with international consultants, were undertaken for the construction of the UHE of Jupíá, and for UHE of Ilha Solteira and also for later works. It is believed that the reaction developed in UHE Jaguari was due to failure in the research methods regarding the potentially reactive aggregates.*

*The visual inspections carried out at the water intake structure of UHE Jaguari, together with the plant operators' reports on operational problems and also the observation of case studies of other structures, resulted in implementing a broad monitoring system at the UHE water intake. This included observing the relative motion of walls and retaining walls, and also parameters to indicate the potential rate of concrete expansion and the gradual progress of the phenomenon and anomalies appearing as a result.*

*There are numerous factors that influence the development of ARR and the magnitude of the expansions. Given the unfamiliarity with the real behavior exhibited by AAR affected structures, detailed information on structural movements are crucial for monitoring programs, namely: periodic visual inspections, additional instrumentation to quantify the displacements of cracks, joints and the structure as a whole, determine the concrete expansion rate and develop three-dimensional mathematical models of structural expansions to estimate the main and potential damage, hence ensuring that early interventions are performed. Interpreting the results of instrumentation can be done by establishing models and criteria to explain the structural behavior of the dam. Understanding the development of expansions allows issuing a feedback on the safety conditions of the structure, and also how to verify the need for mitigation repair works or prevention measures.*

*There are numerous mathematical models that attempt to represent the expansions caused by AAR. To validate the model, field monitoring techniques should be used for comparison and calibration.*



Al establecer modelos matemáticos para el comportamiento de las estructuras, se puede contribuir al diagnóstico de la RAA, facilitar la evaluación de la estructura, anticipar futuras expansiones y la integridad de la estructura, además de observar los efectos de las medidas de reparación implementadas (Bérubé et al., 2002).

Un modelo típico, con elementos finitos, en el cual se introduzcan acciones habituales, con las debidas precauciones, puede ayudar a predecir los niveles de seguridad de la rerepresa, antes de iniciar cualquier modificación. De este modo, el presente estudio examinó el origen de grietas, aparentemente simétricas, observadas en ciertas ubicaciones de la entrada de agua, por medio de un modelo matemático tridimensional, mediante la simulación de expansiones de RAA, en las paredes de la estructura.

### 1.1 Situación actual de la rerepresa

#### Signos de deterioro

En la actualidad, la estructura de entrada de agua de la PH de Jaguari muestra signos de deterioro del concreto, debido a la RAA. Los principales daños en la superficie encontrados en la planta de entrada de agua son las grietas, que a su vez son responsables de la pérdida de permeabilidad del concreto. Además el concreto reforzado se encuentra expuesto a condiciones climáticas, algunas grietas exudan un gel blanco, y existen puntos decolorados en el concreto, entre otros signos.

#### Grietas intensas

Prácticamente todas las estructuras de concreto de la PH de Jaguari muestran grietas intensas. El objetivo de este trabajo está enfocado en la losa de la entrada de agua, que posee grietas de tipo piel de cocodrilo, que son características de la RAA, y grietas con grandes aberturas. La Figura 2 muestra los signos generales del agrietamiento, así como puntos decolorados en el concreto. La Figura 3 muestra aberturas de grietas de 10 mm, también ubicadas en la losa de la entrada de agua, donde el concreto reforzado está expuesto y muestra una reducción de su grosor, debido al contacto directo con condiciones climáticas adversas. Generalmente el concreto reforzado se agrieta, debido al esfuerzo de tracción provocado por la apertura de las grietas, pero en este caso existe una falta de adhesión entre el concreto y el refuerzo.

*Establishing mathematical models for the behavior of structures can assist to diagnose ARR, facilitate the structural assessment, anticipate future expansions and structural integrity and enable to observe the effects of the remedial actions implemented (Bérubé et al., 2002).*

*A typical modeling, in finite elements, in which the customary actions are introduced, with the proper precautions, can predict safety levels of the dam prior to the onset of any changes. Thus, the present study examined the origin of apparently symmetrical cracks observed in certain water intake locations, by means of three-dimensional mathematical modeling and by simulating ARR expansions on the walls of the structure.*

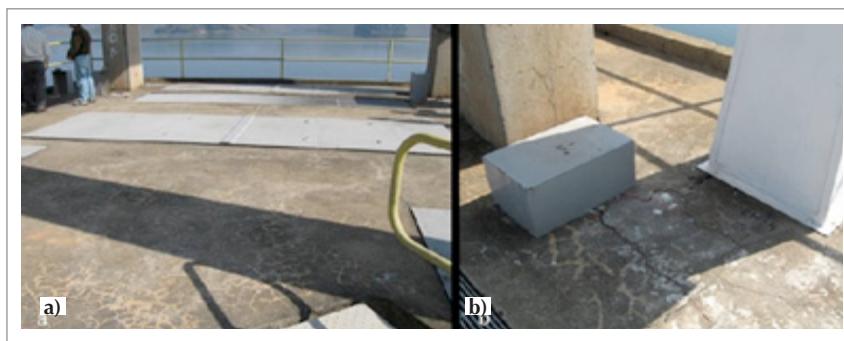
### 1.1 Current dam situation

#### Signs of deterioration

*Currently, the UHE Jaguari water intake structure shows signs of concrete deterioration caused by ARR. The main superficial deteriorations found in the plant's water intake are cracks, which in turn are responsible for the loss of concrete permeability and exposure of the reinforced concrete to weather conditions, there are some cracks exuding white gel, discoloration points of the concrete, among other signs.*

#### Intense cracking

*Virtually all of the concrete structures of UHE Jaguari display intense cracking. The object of this work is the slab in the water intake, which has map-type cracks, characteristic of ARR and cracks with larger openings. Figure 2 shows the overall cracking signs and also the discoloration points in the concrete. Figure 3 shows 10 mm crack openings, also located in the slab of the water intake, where the reinforced concrete is exposed and which exhibits reduced thickness due to its direct contact with weather conditions. The reinforced concrete usually ruptures due to the tensile stress induced by the opening of the cracks, but in this case, there was a loss of adhesion between the concrete and reinforcement.*



**Figura 2.** Agrietamiento en la losa de la entrada de agua de la PH de Jaguari  
(a) Agrietamiento aleatorio, (b) Grietas centrales con fisuras aleatorias alrededor

**Figure 2.** Cracking in the slab at the water intake of UHE Jaguari  
(a) Random Cracking; (b) Oriented cracks with random cracks around it



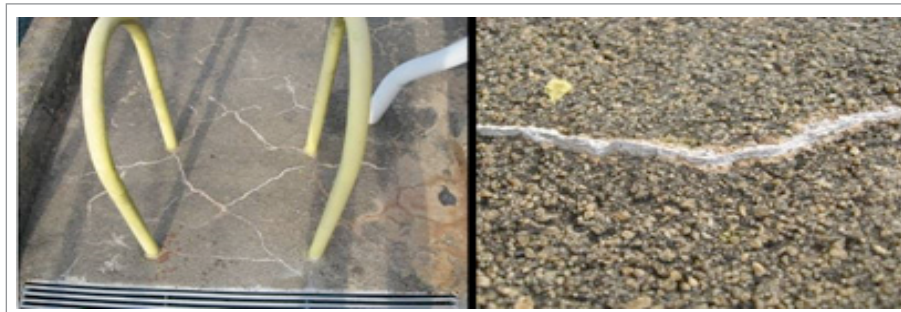
**Figura 3.** Grietas con el refuerzo expuesto  
**Figure 3.** Cracks with exposed reinforcement

#### Probable presencia de gel producido por RAA

Además del agrietamiento tipo piel de cocodrilo, el concreto exuda un material de color blanco en algunas grietas de la losa, que se cree es producto de la RAA. Este material se encuentra bajo estudio. La Figura 4 muestra presencia de exudación.

#### Possible presence of gel from AAR

Apart from the map-type cracking, the concrete exudes a white colored material from some of the cracks in the slab, believed to be the product of AAR. This material is under study. Figure 4 shows the exudation.



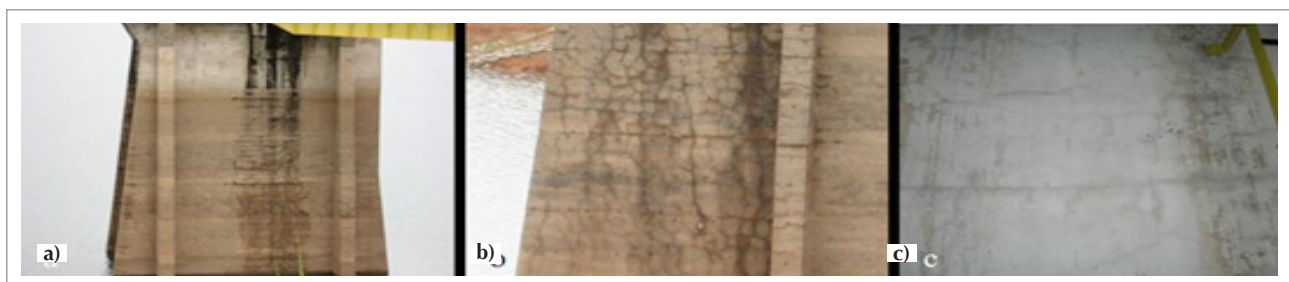
**Figura 4.** Presencia de material blanco en las grietas  
**Figure 4.** Presence of white material in the cracks

#### Grietas en las paredes de la planta de entrada de agua

Los muros y muros de contención están completamente agrietados, en la planta de entrada de agua. Todas sus fachadas muestran el mismo tipo de agrietamiento. Como ilustra la Figura 5, incluso las paredes interiores del cuarto del servomotor poseen agrietamiento. Esto demuestra que el agrietamiento, debido a la RAA, traspasa el grosor de las paredes.

#### Cracks on the walls of the water intake plant

There are completely cracked walls and buttresses at the water intake plant. All faces show the same type of cracking. As shown in figure 5, even the internal walls of the servomotor chamber show signs of cracking. This demonstrates that cracking due to AAR occurs throughout the thickness of the walls.



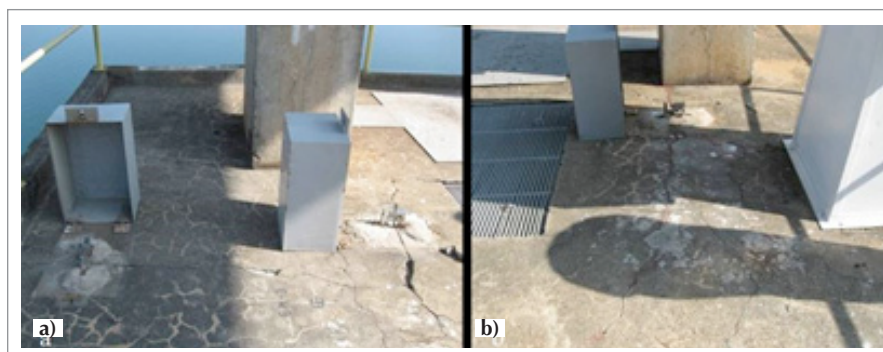
**Figura 5.** Grietas aleatorias en las fachadas interiores y exteriores de los muros y muros de contención, en la entrada de agua. (a) Muro exterior, (b) muro de contención y (c) muro interior

**Figure 5.** Random cracks on internal, external walls and buttresses of the water intake.  
(a) External wall; (b) Buttress; (c) Internal wall

## 2. Materiales y métodos

### 2.1 Grietas tipo piel de cocodrilo en la losa

La inspección visual de la losa de la entrada de agua reveló la presencia de grietas, aparentemente simétricas, alrededor de los pilares de la grúa pórtico de carga. Se instalaron sensores tri-ortogonales en las grietas, para monitorear los desplazamientos. Estas grietas pueden haber sido provocadas, directa o indirectamente, por la RAA, que es lo que este estudio pretende verificar empleando un modelo matemático tridimensional de la estructura. La Figura 6 muestra la ubicación de estas grietas y las imágenes de los sensores tri-ortogonales instalados en la losa.



**Figura 6.** Sensores tri-ortogonales ( $TM$ ) instalados en las grietas centrales, en la losa de la entrada de agua. (a)  $TM - 2$  and  $TM - 3$ ; (b)  $TM - 1$   
**Figure 6.** Tri-orthogonal meters ( $TM$ ) installed in oriented cracks, in the slab of the water intake. (a)  $TM - 2$  and  $TM - 3$ ; (b)  $TM - 1$

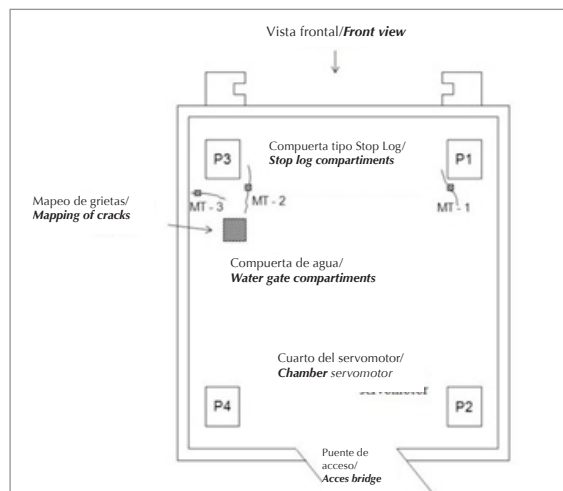
El mapeo fue desarrollado para catalogar las grietas, en algunos lugares de la losa, en la entrada de agua de la PH de Jaguari. Este se realizó fijando una película plástica en una ubicación previamente determinada, con una superficie cercana a  $1m^2$  donde las grietas ubicadas bajo el plástico fueron marcadas en el concreto, empleando un lápiz de color. A su debido tiempo, el plástico nuevamente será adherido a la misma ubicación, empleando un lápiz de distinto color. Los cambios ocurridos en esa área específica serán dibujados a partir del primer mapa, por lo tanto, la aparición de nuevas grietas y el aumento de las ya existentes podrán ser monitoreadas. La Figura 7 muestra el lugar donde se realizó este mapeo, a lo largo de la losa, y la ubicación de las grietas alrededor de los pilares, que muestran el esquema de la planta de entrada de agua. La Figura 8 muestra el mapeo realizado.

## 2. Materials and methods

### 2.1 Mapping of cracks in the slab

Visual inspection of the slab at the water intake revealed the existence of apparently symmetrical cracks around the pillars of the loading gantry. Tri-orthogonal meters were installed on the cracks to monitor the displacements. These cracks may have been caused directly or indirectly by ARR, which is what this study intends to verify, using a three-dimensional mathematical modeling of the structure. Figure 6 shows the location of these cracks and images of the tri-orthogonal meters installed in the slab.

Mapping was performed in order to catalog the cracks in some places of the slab in the water intake of UHE Jaguari, this consisted in affixing a plastic film to a previously determined location, an area of about  $1m^2$ , where the cracks located under the plastic were drawn on the concrete using a colored pen. In due time, the plastic will again be affixed in the same location, and using a different color pen, the changes that occurred in that specific area will be drawn from the first map, therefore the appearance of new cracks and the increase of the existing ones can be monitored. Figure 7 shows the place where this mapping was performed along the slab, and the location of the cracks around the pillars, which shows the sketch of the water intake plant. Figure 8 illustrates the mapping performed.



**Figura 7.** Vista superior del esquema de la losa, en la entrada de agua de la PH de Jaguari  
**Figure 7.** Top view sketch of the slab at the UHE Jaguari water intake



**Figura 8.** Mapeo de las grietas en la losa  
**Figure 8.** Mapping of cracks along the slab

## 2.2 Modelo computacional de la entrada de agua

Modelamiento de la geometría y de la conexión exterior

El modelamiento de la estructura de entrada de agua empleó datos constantes de la geometría de un proyecto de ejecución desarrollado por una empresa de diseño, contratada por el mandante en los años sesenta. La Figura 9 muestra la etapa final de la construcción.

## 2.2 Computational modeling of water intake

Modeling the geometry and external connection

The modeling of the water intake structure used constant geometry data for the executive project carried out by a designer company, contracted by the owner in the 1960s. Figure 9 shows the final stage of construction.



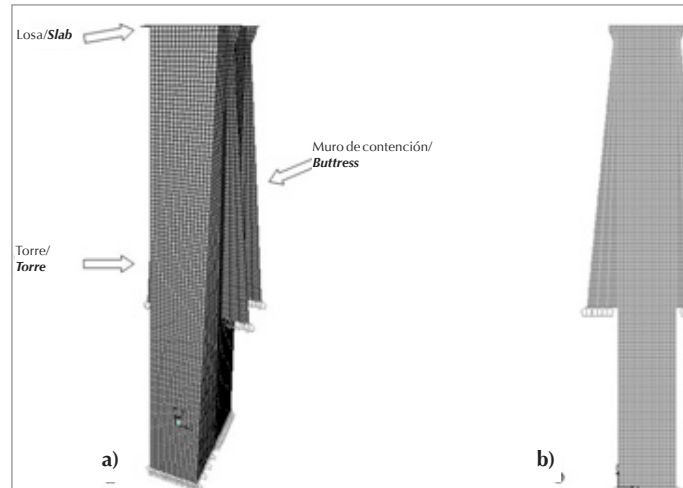
**Figura 9.** Entrada de agua en la PH de Jaguari (vista frontal), en la etapa final de la construcción  
**Figure 9.** Water intake of UHE Jaguari (front view) at the final stage of construction

En el programa computacional empleado, los datos ingresados de la geometría de la estructura coinciden con el criterio de elementos finitos. En primer lugar, se creó una torre de 63m, empleando elementos finitos CSQ – Constant Strain Quad; en otras palabras elementos cuadrangulares con cuatro nodos e interpolación lineal para los desplazamientos. La torre está compuesta de muros interiores y exteriores, de acuerdo al diseño estructural. Luego se crearon seis muros de contención, y por último, la losa fue modelada ubicándose en la parte superior de la torre, cuyas medidas son 10.5m x 11.5m.

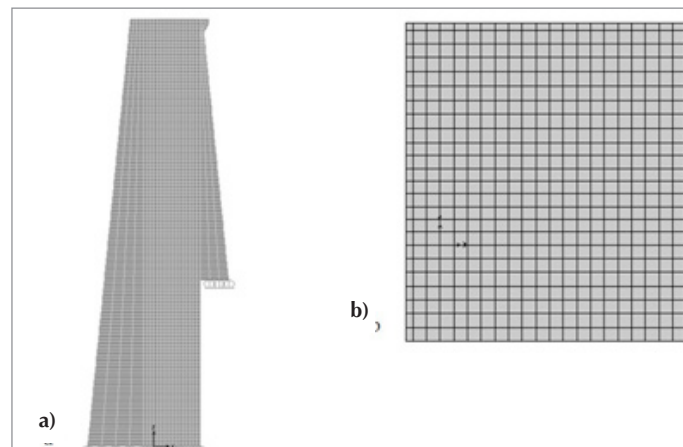
In the computer program used, the geometry data input of the structure coincides with the finite element discretization. First, a 63m tower was created, using finite element CSQ – Constant Strain Quad, in other words, quadrangular elements with four nodes and linear interpolation for displacements. The tower is composed of internal and external walls, according to the structural design. Next, the six buttresses were made, and last, the slab was modeled, located at the top of the tower, measuring 10.5m x 11.5m.

La Figura 10a proporciona una vista de la entrada de agua con la torre, muros de contención y la losa, que fueron modelados a partir de elementos finitos. Las Figuras 10b, 11a y 11b, ilustran la vista frontal, el lado derecho y la vista superior de la losa de la estructura, respectivamente. La conexión exterior de la estructura descansa en una masa rocosa, en la región inferior del muro y del muro de contención.

Figure 10a provides a view of the water intake with the tower, buttresses and slab, modeled using finite elements, and Figures 10b, 11a,b illustrate the front, right side and top views (of the slab) of the structure, respectively. The external connection of the structure rests on the rocky mass in the lower wall and buttress region.



**Figura 10.** (a) vista lateral, (b) Vista frontal  
**Figure 10.** (a) Side view; (b) Front view



**Figura 11.** (a) Vista del lado derecho, (b) Losa  
**Figure 11.** (a) Right Side View; (b) Slab

### Modelamiento de las expansiones y proceso

La simulación de las expansiones, producidas por la RAA, fue realizado tomando en cuenta la expansión térmica provocada por una temperatura hipotética, de 10 grados centígrados, que corresponde a una deformación de  $100 \times 10^{-6}$ . La deformación fue aplicada a los muros de la torre, región de la estructura inmersa en el embalse de agua, por lo tanto se considera que está más susceptible a las expansiones de RAS.

### Modeling of expansions and processing

The simulation of the expansions due to ASR was done taking into consideration the thermal expansions caused by a hypothetical temperature of 10 degrees centigrade, corresponding to a deformation of  $100 \times 10^{-6}$ . The deformation was imposed on the tower walls, the region of the structure that is immersed in the water reservoir, therefore considered more susceptible to ASR expansions.

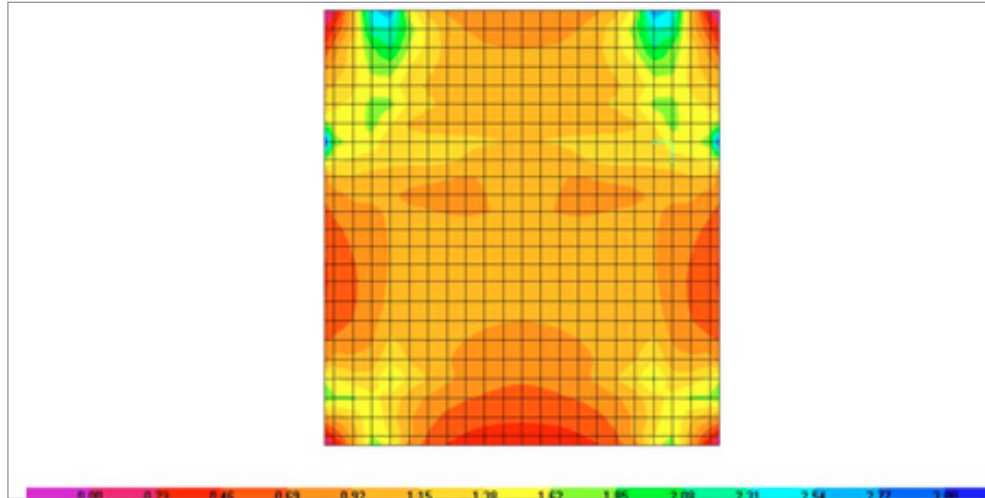


### 3. Resultados y discusión

La Figura 12 muestra los resultados obtenidos, en términos de máximo esfuerzo sobre la losa de la entrada de agua, con su respectiva gama de colores. Como se puede observar, las regiones de la losa sujetas a máximo esfuerzo, corresponden a las áreas adyacentes a los pilares P1 y P3, en las secciones contra-corriente, donde las grietas están más abiertas.

### 3. Results and discussion

Figure 12 shows the results obtained in terms of maximum stress in the slab of the water intake, with the respective color palette. As can be seen, the regions of the slab subject to the maximum stresses correspond to the regions adjacent to the pillars P1 and P3, in the upstream sections where the cracks are more open.



**Figura 12.** Esfuerzos absolutos máximos en las losas ( $10^3$  kN/m<sup>2</sup>)  
**Figure 12.** Absolute maximum stresses in the slabs ( $10^3$  kN/m<sup>2</sup>)

Según la Figura 13, la región que presenta el mayor agrietamiento es la que está alineada con el muro de contención, ubicada en el área inferior. Este resultado muestra que, probablemente, la apertura pronunciada de las grietas en las esquinas de la losa, se debe a la expansión de los muros de la torre y de los muros de contención. Sin embargo el agrietamiento de la losa, debido a expansión, ocurre de forma algo discreta en la forma tradicional, con la distribución aleatoria de tipo mapa, sin presentar una dirección preferente y con presencia de material de exudación.

According to Figure 13, the region with the most intense cracking is aligned with the buttresses, located in the lower region. This result shows that, possibly, the most pronounced opening of the cracks in the corners of the slab is due to the expansion of the walls of the tower and buttresses. However, the cracking of the slab due to expansion occurs somewhat more discretely, in the traditional way, with random map-type distribution, without a preferential direction, and with the presence of exudative material.



**Figura 13.** Agrietamiento de la losa, con refuerzo expuesto; mostrando el muro de contención al fondo  
**Figure 13.** Cracking in the slab with exposed reinforcement, with buttress in the background

La comparación de los resultados, obtenida a través de la inspección visual, del mapeo de las grietas y con el procesamiento del modelo computacional de la estructura, muestra la evidencia del origen de las grietas. Se observó que existen, al menos, dos tipos de agrietamiento; uno con grietas más abiertas y dirigidas, y el otro con grietas que poseen mayor características de las expansiones producidas por la RAS.

## 4. Conclusión

La metodología empleada permitió formular una hipótesis, de manera que algunas aperturas de grietas sean significativamente mayores que otras, dentro de la misma losa. Si esta hipótesis logra ser confirmada, en el curso de los próximos años, la información recogida por los sensores de desplazamiento instalados en la losa, podrá ser usada para estimar en forma cuantitativa las expansiones que ocurrieron en la estructura debido a la RAS. Los resultados de estas estimaciones podrán ser medidos con posterioridad, dentro de algunos años, y los registros de los recientemente instalados sensores serán empleados para medir las expansiones de la torre de entrada de agua.

## 5. Agradecimientos

Los autores agradecen a FAPESP por el apoyo financiero, a ANEEL por financiar el Proyecto de Investigación y Desarrollo (R&D), llevado a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Civil CESP en conjunto con la UNESP, facultad de Ilha Solteira; y al Laboratorio de Ingeniería Civil CESP.

## 6. Referencias/References

- Bérubé M. A., Duchesne J., Dorion J. F., Rivest M. (2002)**, Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity, *Cement and Concrete Research*, 32 (8), 1215-1227.
- Companhia Energética de São Paulo – CESP. (2013)**, Usina Hidrelétrica Jaguari. Available in: <<http://www.cesp.com.br>>. Accessed on April 15.
- Fournier B., Bérubé M. A. (2000)**, Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 27, 226-245.
- Fournier B., Bérubé M. A., Thomas M. D. A., Folliard K. J. (2005)**, Mitigation of the effect of alkali-silica reaction in concrete structures: a review, *IBRACON Materials Journal*, 1 (1), 35-42.
- Lu D., Zhou X., Zhongzi X., Lan X., Tang M., Fournier B. (2006)**, Evaluation of laboratory test method for determining the potential alkali contribution from aggregate and the ASR safety of the Three-Gorges dam concrete, *Cement and Concrete Research*, 36, 1157-1165.
- Mehta P. K., Monteiro P. J. M. (2008)**, *Concrete: microestrutura, propriedades e materiais*, 3ª Edition, São Paulo: IBRACON, Brasil.
- Priszkulnik S. (2005)**, Inspeção e diagnóstico de estruturas de concreto afetadas pelas reações cimento-agregado, ISAIA, G. C. (Ed.), *Concrete: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, 2, 1017-1071.

*The comparison of the results, obtained with the slab's visual inspection and the mapping of cracks and with the processing of the computational model of the structure, shows evidence of the origin of cracking. It was observed that there are at least two types of cracking, one with more open and directed cracks and another with cracks more characteristic of ASR expansions.*

## 4. Conclusion

*The methodology used enabled to formulate a hypothesis so that some crack apertures are far bigger than others, in the same slab. Additional studies should be conducted to confirm the hypothesis presented herein, the opening of cracks in the slab, as a result of expansions in the walls and buttresses of the tower. If this hypothesis is confirmed, over the course of several years the information retrieved from the displacement meters installed in the slab may be used to quantitatively estimate the expansions that occur in the structure due to ASR. The results of these estimates may be measured later, within a few years, with the readings of the recently installed extensometers to directly measure the expansions of the water intake tower.*

## 5. Acknowledgements

*The authors are grateful to FAPESP for the financial help; to ANEEL for financing the Research and Development project (R&D) carried out by the CESP Laboratory of Civil Engineering in partnership with UNESP, campus of Ilha Solteira; and to CESP Civil Engineering Laboratory.*