

Implementación de Técnica de Diagnóstico no-invasivo en para el Mantenimiento de Compuertas Radiales Hidroituango

POR
LUIS FERNANDO MIRA ALBANES

Proyecto de grado para optar al título de
Magister en Ingeniería con profundización en turbo maquinas

Asesor:
Francisco Javier Botero Herrera

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE CIENCIAS APLICADAS E INGENIERIA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLIN
2023

1 Introducción

Las compuertas radiales son estructuras móviles que en los vertederos permiten controlar el nivel del embalse y evacuar grandes caudales en épocas de crecientes. Las del vertedero de la central hidroeléctrica Ituango fueron diseñadas sin contrapeso y cuentan con una unidad oleo-hidráulica para su operación. Son accionadas por dos servomotores hidráulicos de simple efecto conectados al mismo circuito hidráulico. Estas compuertas tienen la capacidad de abrir y de cerrar con flujo, es decir, con presiones desequilibradas a partir de cualquier posición.

Las fallas más críticas de este tipo de compuertas se deben principalmente a fatiga en vástagos de servomotores, deformación por torsión, deformación por flexión y excitación de frecuencias naturales debido a cargas cíclicas inducidas por la interacción fluido-estructura durante la operación de la compuerta. La condición y evolución de la fricción por el desgaste de los cojinetes en los muñones de la compuerta es responsable de varias de ellas. Por ejemplo, un incremento significativo en el coeficiente de fricción puede, por un lado, acentuar la compresión en los brazos y exceder las cargas admisibles de pandeo; por otro lado, los servomotores se verían obligados a aumentar las fuerzas de tensión y así mismo la presión en el circuito hidráulico. Si el desgaste en ambos muñones es asimétrico, entonces la deformación de los brazos también produciendo cargas de torsión en la compuerta que no es diseñada para soportarlas. Por eso este trabajo se enfoca en la implementación de una técnica de no-invasiva para el diagnóstico del estado de los cojinetes de las compuertas radiales de la central Ituango.

Se programa una prueba dinámica en la compuerta #4 del vertedero de la central Ituango, que permite reunir la evidencia suficiente para validar el desempeño de la técnica. Para ello se instalan galgas extensométricas en dos secciones transversales correspondientes de las vigas superior e inferior de cada brazo, y en los vástagos de los servomotores. Todos los instrumentos se registran simultáneamente, sincronizados además con la posición de la compuerta. Adicionalmente, se evalúa bajo norma internacional la condición de estado estructural de brazos y vástagos para las condiciones normales y excepcionales de operación prestando especial atención en zonas de concentración de esfuerzos. Se contrató un equipo multidisciplinario para la instrumentación, medición y simulación numérica de regiones críticas de interés. Los datos presentados son el resultado de la prueba mencionada y algunas de las imágenes son tomadas de los reportes técnicos entregados por el contratista.

2 Antecedentes

2.1 Central Hidroeléctrica Ituango

La Central Hidroeléctrica Ituango está situada en el noroccidente del departamento de Antioquia, aproximadamente a 170 kilómetros de la ciudad de Medellín. Está ubicada en los municipios de Ituango y Briceño, en donde se localizan las obras principales.

La presa está localizada sobre el río Cauca, en la vía al municipio de Ituango, inmediatamente aguas arriba de la desembocadura del río Ituango al río Cauca. En el sitio del proyecto el río tiene un caudal medio de 1.010 m³/s. En la casa de máquinas están proyectadas 8 unidades de generación de 307 MW cada una, con rodets tipo Francis de eje vertical y un caudal de diseño de 169 m³/s para cada turbina.

2.2 Características del vertedero y las compuertas radiales

La central hidroeléctrica Ituango cuenta con un vertedero de canal abierto, con una capacidad de descarga de 22.600 m³/s y está conformado por dos canales: el primero provisto con una compuerta radial y el segundo compuesto por tres compuertas radiales, las cuales pueden operarse de manera independiente.

Cada compuerta tiene un peso de aproximado de 240 toneladas y unas medidas de 16,5 m de ancho, 21,5 m de alto y 26 m de radio, y es operada por dos cilindros hidráulicos. El cuerpo y los brazos radiales forman una estructura metálica rígida, que gira sobre dos cojinetes instalados en el eje de articulación. Los únicos elementos móviles del sistema son la propia compuerta y los servomotores, que están dotados de rótulas en sus extremos. *Figura 1*

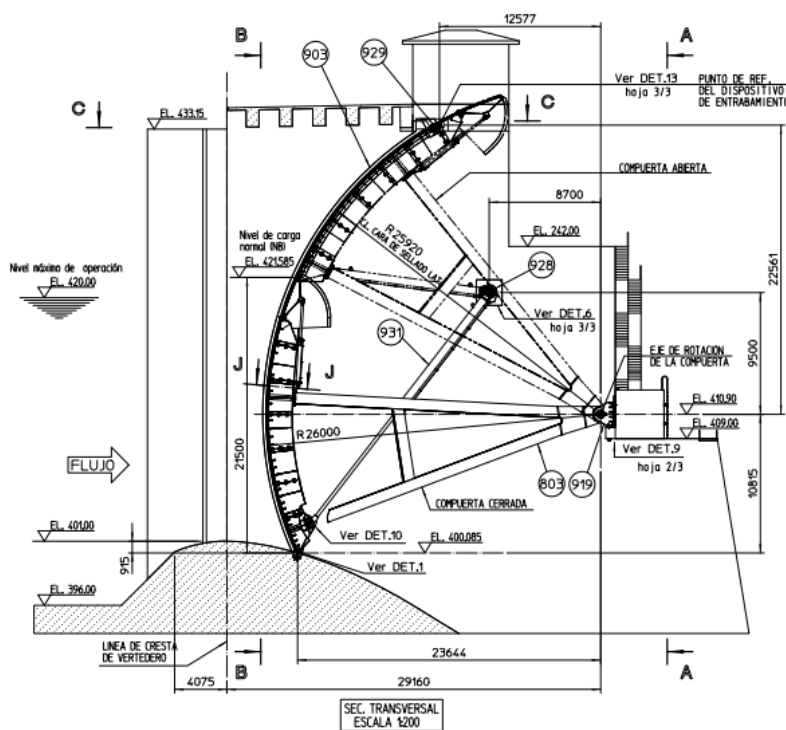


Figura 1. Datos generales de la compuerta del vertedero – CHI

2.3 Importancia de las compuertas radiales

Las compuertas radiales instaladas en los vertederos influyen de manera directa en la seguridad de las presas y afectan de manera significativa la disponibilidad de las centrales de generación de energía hidráulica [1]. Estas son operadas con el objetivo de regular el nivel del embalse, evacuar excedentes de agua durante la temporada invernal o garantizar el cumplimiento de la regla operativa de la central, evacuando los caudales mínimos aguas abajo de la presa.

A pesar de su relevancia, es común encontrar problemas en estos equipos, debido a deficiencias en el diseño, baja frecuencia de operación o prácticas inadecuadas de mantenimiento durante su vida útil. El colapso de una compuerta en cualquier central hidráulica genera grandes afectaciones y pérdidas

(ambientales, sociales, económicas, reputacionales, entre otros). De aquí la importancia de contar con herramientas diagnósticas que permitan evaluar la condición operativa de sus componentes principales, sin generar paradas de planta o desembalses que afecten la generación de energía.

Las compuertas radiales de la central Hidroeléctrica Ituango están diseñada de acuerdo con las Especificaciones Técnicas y según la norma DIN 19704, Edición 1976.

2.4 Régimen operativo de las compuertas

La operación de las compuertas radiales del vertedero de la central hidroeléctrica Ituango se realiza de manera atípica, debido a requisitos técnicos que surgieron producto de la contingencia que se presentó por el taponamiento de la GAD en el año 2018 [2]. El nivel operativo del embalse está limitado a la cota 408,5 msnm, cuando la cota de diseño es de 420 msnm, esta restricción limita la capacidad de almacenamiento de agua en el embalse y exige mayor número de maniobras de apertura y cierre. Adicionalmente, la central se encuentra en proceso de construcción y las unidades de generación aun no entran en servicio, por lo cual el agua no fluye a través de las tuberías de conducción de cada máquina.

La licencia ambiental exige que no se deben realizar cambios en el caudal aguas abajo de la presa, superiores al 10%, esta medición se realiza hora a hora.

Estas restricciones han obligado a que la operación de las compuertas radiales tenga una frecuencia mayor a la prevista en el diseño original del proyecto.

Los reportes históricos de operación de las compuertas indican que entre los años 2018 y 2022 cada compuerta ha estado en posiciones intermedias, es decir, regulando caudal, en promedio 19.000 horas, algunas de ellas han estado operativas el 84% del tiempo.

2.5 Problemas en compuertas radiales

Aunque de operación simple, estos equipos están sujetos a fallas estructurales, principalmente ocasionadas por el aumento de las fuerzas de fricción en las rótulas y bujes de los muñones [3]. Con frecuencia las fuerzas de fricción en los muñones son despreciadas en los cálculos estructurales o se utiliza un coeficiente de fricción nominal, luego de un tiempo de operación los valores del coeficiente de fricción se incrementan, y los brazos y vástagos son sometidos a esfuerzos que sobrepasan los límites del diseño ocasionando su ruptura o el colapso de las estructuras.

Los estudios realizados en este artículo son motivados por la preocupación generada por el régimen operativo de las compuertas. Adicionalmente, en la literatura existen dos trabajos de referencia relacionados con las fallas de vástagos de compuertas radiales que describen las fallas en las centrales de *Itaipu* [4] y de la central de *Tucurui* [5]. En este artículo se hará énfasis en los detalles de estas fallas por la similitud con las compuertas de Hidroituango.

2.6 Diagnóstico estructural de una de las compuertas

Se adopta una interesante propuesta para medir indirectamente el coeficiente de fricción en los muñones a partir de la medición del momento de flexión en los brazos [3]. Se prepara una prueba dinámica (apertura y cierre) que evidencie los momentos de flexión en los brazos debidos exclusivamente a la fricción. Se instalan galgas extensométricas en dos secciones transversales correspondientes de las vigas superior e inferior de cada brazo, y en los vástagos de los servomotores.

Todos los instrumentos se registran simultáneamente, sincronizados además con la apertura de la compuerta.

3 Metodología

3.1 Instrumentación y modelos de cálculos

3.1.1 Brazos

La compuerta consta de dos brazos y cada brazo se compone de dos vigas radiales, una superior y otra inferior. Cada viga debe soportar la carga axial de compresión debido a la fuerza hidrostática del embalse, y cargas cortantes y flexionantes debido al peso de la compuerta, el empuje por el flujo de agua, la acción de los cilindros hidráulicos y la fricción en el muñón y sellos laterales.

3.1.2 Modelo de cálculo del momento flector friccional en los brazos

Teniendo en cuenta la estructura de la compuerta, las cargas que actúan sobre los brazos y las simetrías, el análisis del brazo se puede reducir a dos dimensiones¹. De este modo, al considerar las condiciones de equilibrio en el instante de movimiento inminente debido al inicio de una maniobra de apertura, y aplicar el *método de las secciones* [6] a uno de los brazos, resulta un sólido sometido a cargas combinadas como el que se representa en la *Figura 2*. Sobre el muñón (derecha) se representan la carga normal resultante N_R dominada por la fuerza hidrostática y el momento debido a la fricción M_{FR} . Las secciones transversales que quedan expuestas de las vigas superior e inferior estarían sometidas a un estado de cargas combinadas: una fuerza normal N , una fuerza cortante V y un momento flector M . Los subíndices s e i hacen referencia a la viga *superior* e *inferior*, respectivamente.

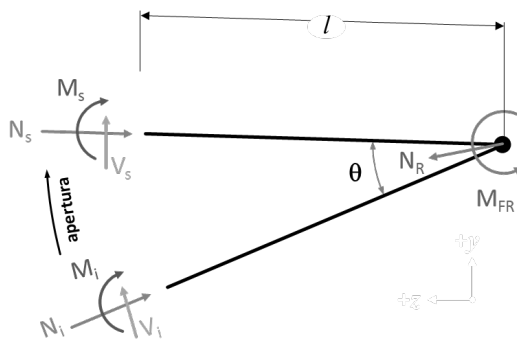


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre de una porción de la compuerta. Método de las secciones

Las direcciones de los momentos y fuerzas internas son los esperados durante una maniobra de apertura. Las fuerzas de fricción en el cojinete siempre actúan en contra de la dirección del movimiento de la compuerta; es decir, durante una eventual maniobra de cierre se espera que el momento friccional sea la única carga que cambie de sentido. Así, partiendo de las condiciones de equilibrio para la situación de la figura, se puede llegar a la expresión del momento friccional M_{FR} :

¹ Este supuesto queda soportado por el comportamiento de las deformaciones unitarias medidas.

$$M_{FR} = \underbrace{M_s + M_i}_{M_R} + l(V_s + V_i)$$

Más adelante se estimará el cortante en términos del momento flector en la sección de los brazos para finalmente poder calcular el momento friccionante. Por el momento, nos concentraremos en estimar, a partir de las deformaciones medidas en los brazos, el momento interno resultante.

$$M_R = M_s + M_i \quad (1)$$

3.1.3 Ubicación e instalación de galgas extensométricas en los brazos

Partiendo de la hipótesis cinemática básica de vigas sometidas a flexión simétrica [1], se establece la relación entre el momento flector interno resultante, las propiedades geométricas de la respectiva sección transversal, las propiedades del material, los esfuerzos y las deformaciones unitarias; esto es, fusionando la *Ley de Hooke* para esfuerzo normal uniaxial (ecuación 2) y el estado de esfuerzo normal combinado debido exclusivamente a la *carga axial* y a la *flexión* [2] aplicada a los puntos de instalación de las galgas extensométricas (ecuación 3).

$$\sigma = \epsilon E \quad (2)$$

$$\sigma = -\frac{N}{A} - \frac{My}{I} \quad (3)$$

En estas ecuaciones σ es el esfuerzo normal en una determinada partícula de la sección transversal, ϵ es la deformación unitaria correspondiente (lectura de la galga extensiométrica), E es el *módulo de elasticidad*², N y M son la carga axial y el momento flector interno resultantes de la respectiva sección transversal de análisis. A e I son propiedades geométricas de la sección transversal; esto es, área y momento de inercia³ con respecto al eje neutro. La distancia del eje neutro hasta el punto de interés⁴ está determinado por y , que es negativa para ubicaciones por encima del eje neutro y viceversa.

El efecto del momento flector se puede desacoplar de la ecuación (3), teniendo en cuenta la distribución lineal que exhiben las deformaciones unitarias a lo largo del eje vertical. Se puede concluir lo siguiente: a) la deformación debido a la carga axial es igual para todas las partículas de la sección transversal; b) las deformaciones unitarias debidas a la flexión son iguales a distancias iguales del eje neutro, pero el signo es opuesto si queda por debajo; c) para la maniobra de apertura (*Figura 2*) las partículas en las superficies superiores de ambas vigas son las que sufren la mayor deformación unitaria (compresión); d) las partículas en las superficies inferiores de ambas vigas son las que sufren la menor deformación unitaria (compresión debido a N y tensión debido a M); e) la deformación unitaria normal es igual al promedio de la deformación de la superficie superior e inferior compensando los signos de acuerdo a la posición; f) la deformación debida exclusivamente al momento flector se puede obtener como la deformación de la superficie superior o inferior menos la deformación promedio.

Por lo anterior, se estableció como punto ideal de instalación de las galgas, las superficies superiores e inferiores de cada viga. Para reducir los errores sistemáticos y debido a la facilidad para orientar las galgas durante la instalación, se sugirió instalar dos galgas en cada una de las superficies, una hacia el extremo derecho y otra hacia la izquierda. De este modo, la deformación unitaria correspondiente

² $E \approx 200$ GPa para el acero estructural.

³ $A = 98.4 \times 10^{-3} \text{m}^2$ e $I = 11 \times 10^{-3} \text{m}^4$ (Fuente: memoria de cálculo 300000092-N-0805)

⁴ Punto de instalación de la galga extensométrica.

en cada superficie sería el promedio de ambas galgas. Además, debido a la simetría y simplicidad de la sección transversal (*Figura 3*) se puede reducir aún más la incertidumbre de las lecturas al expresar una única deformación unitaria para cada sección transversal como el promedio algebraico de las lecturas de las cuatro galgas adaptando los signos de las galgas inferiores (ecuación 4). Así se compensa simultáneamente la deformación axial (normal) superpuesta y la deformación causada por los cambios térmicos.

$$\epsilon = \frac{\epsilon_{sd} + \epsilon_{si} - \epsilon_{id} - \epsilon_{ii}}{4} \quad (4)$$

El momento flector interno resultante en determinada sección transversal se puede expresar directamente en función de una única medida, resultado de la lectura de cuatro galgas estratégicamente ubicadas y orientadas; esto es, en las superficies y orientación del esfuerzo principal:

$$M = \frac{-\epsilon EI}{y} \quad (5)$$

Al combinar las ecuaciones (5) y (4) se obtiene la expresión para el momento flector interno en las secciones trasversales respectivas de las vigas superior e inferior. Si además se conectan en la ecuación (1) entonces se tiene la expresión que permite obtener el momento friccional en cada muñón, en función de las lecturas de ocho galgas:

$$\epsilon_s = \frac{\epsilon_{s_{sd}} + \epsilon_{s_{si}} - \epsilon_{s_{id}} - \epsilon_{s_{ii}}}{4} \quad (6)$$

$$\epsilon_i = \frac{\epsilon_{i_{sd}} + \epsilon_{i_{si}} - \epsilon_{i_{id}} - \epsilon_{i_{ii}}}{4} \quad (7)$$

$$M_R = EI \left(\frac{\epsilon_s}{y_s} + \frac{\epsilon_i}{y_i} \right) \quad (8)$$

Debido a las difíciles condiciones de acceso para la instrumentación en la viga inferior, se reubicaron esas galgas. Entonces, las galgas de la viga inferior se instalaron en las caras laterales, a 50 mm de las superficies superior e inferior, de modo que $y_i = 375$ mm mientras que $y_s = 425$ mm.

3.1.4 Cilindros hidráulicos

La compuerta consta de dos cilindros hidráulicos de simple efecto, uno a cada lado de la compuerta. La carrera total de los servomotores es de 10040 mm para una maniobra de apertura o cierre total, que tarda aproximadamente 3600 segundos. Los cilindros trabajan siempre a tensión.

3.1.5 Modelo de cálculo de la tensión del vástago

El análisis del vástago del cilindro hidráulico se puede reducir a una dimensión⁵ si se considera como un eslabón [7]. De este modo, al considerar las condiciones de equilibrio en el instante de movimiento inminente debido al inicio de una maniobra de apertura o cierre, y aplicar el *método de las secciones* [6] al extremo de uno de los vástagos, resulta un sólido sometido a tensión pura⁶ como el que se

⁵ Este supuesto queda soportado por el comportamiento de las deformaciones unitarias medidas.

⁶ El efecto de la flexión en el vástago se puede compensar a partir del patrón de instalación de las galgas extensométricas.

representa en la *Figura 3*. La sección transversal que queda expuesta estaría sometida únicamente a una fuerza normal interna resultante N .

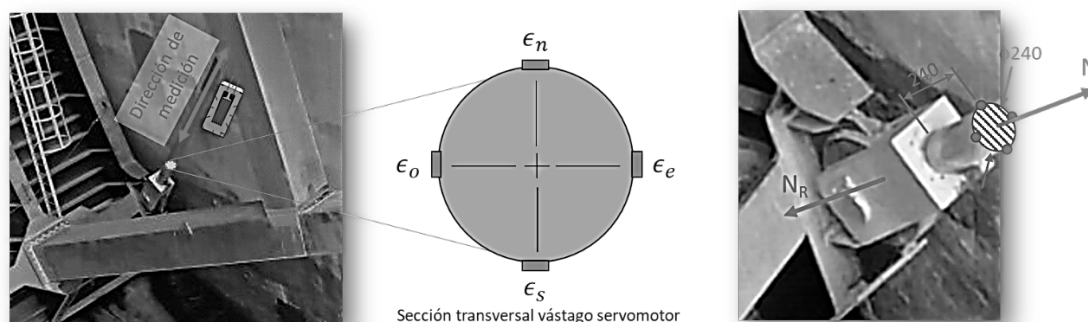


Figura 3. Diagrama de cuerpo libre de una porción del vástago de un servomotor hidráulico. Se indican los puntos de instalación de galgas extensométricas para la estimación de la fuerza de tensión N . Método de las secciones.

Las direcciones de las fuerzas son los esperados durante una maniobra. Así, partiendo de las condiciones de equilibrio para la situación de la figura, se puede llegar a la expresión de la tensión en el vástago N_R :

$$N_R = N \quad (9)$$

3.1.6 Ubicación e instalación de galgas extensométricas en los vástagos

Suponiendo la hipótesis del modelo de *eslabón* para el vástago del cilindro hidráulico, se puede aplicar la *Ley de Hooke* para esfuerzo normal uniaxial (ecuación 2) y la definición del *esfuerzo normal promedio* (ecuación 10) para tener una expresión de la tensión en el vástago N_R en función de la lectura de la deformación unitaria de cualquier partícula de la sección transversal (ecuación 11).

$$\sigma = \frac{N}{A} \quad (10)$$

$$N = \epsilon AE \quad (11)$$

En estas ecuaciones σ es el esfuerzo normal en una determinada partícula de la sección transversal, ϵ es la deformación unitaria correspondiente (lectura de la galga extensométrica), E es el *módulo de elasticidad*⁷, N es la carga axial y A es el área⁸ de la sección transversal.

La deformación unitaria de cualquier partícula, debida exclusivamente a la carga normal interna resultante, se puede estimar como el promedio de lecturas en diferentes partículas. Se estableció como punto ideal de instalación de las galgas, los cuatro puntos cardinales superficies de la sección transversal (n , s , e , o), ver *Figura 3*. Este patrón de instalación permite reducir la incertidumbre de la medición expresando la deformación unitaria como el promedio de las lecturas de las cuatro galgas (ecuación 12). Así se compensa simultáneamente las deformaciones superpuestas debidas a la flexión y los cambios térmicos.

⁷ $E \approx 210$ GPa para el material 39NiCrMo3 (documento 300000092-N-0803).

⁸ $A = 45.24 \times 10^{-3} \text{m}^2$ para un diámetro de $240 \times 10^{-3} \text{m}$ (Fuente: memoria de cálculo 300000092-N-0803 C R)

$$\epsilon = \frac{\epsilon_n + \epsilon_s + \epsilon_e + \epsilon_o}{4} \quad (12)$$

Al combinar las ecuaciones (11) y (12) se obtiene la expresión para la tensión en el vástago del servomotor hidráulico:

$$N_R = AE \left(\frac{\epsilon_n + \epsilon_s + \epsilon_e + \epsilon_o}{4} \right) \quad (13)$$

3.1.7 Variables complementarias

Se consideraron algunas variables adicionales que permitieran correlacionar adecuadamente los datos medidos contra la apertura de la compuerta y las deformaciones debidas a los cambios térmicos.

3.1.8 Testigos de deformación térmica

Se instalaron dos galgas extensométricas instaladas en dos especímenes fabricados en los mismos materiales respectivos de los brazos de la compuerta, y del vástago del cilindro hidráulico. Cabe aclarar que los especímenes no fueron expuestos a cargas mecánicas. Esto con el propósito de monitorear las alteraciones en la deformación unitaria que se pudieran inducir debido a los cambios térmicos⁹.

3.1.9 Posición de la compuerta

Se registró la posición de la apertura de la compuerta en tiempo real. Esta información es fundamental para el análisis de los datos, debido a la naturaleza dinámica de la prueba. Las cargas sobre los brazos y vástagos dependen, entre otras, de la apertura de la compuerta.

La información de la apertura de la compuerta se recibió como una señal analógica de corriente continua comprendida entre 4 y 20 mA para el rango de actuación de la compuerta.

3.1.10 Procedimiento de la Prueba

La prueba consistió en abrir y cerrar la compuerta, mientras se registran los datos de las galgas extensométricas en el sistema de adquisición de datos *MGCplus12F*¹⁰ de la marca alemana HBM.

Estos datos se analizan posteriormente para determinar los momentos de flexión en los muñones, las tensiones y cargas en los vástagos de los cilindros hidráulicos.

Las maniobras se registraron en cuatro niveles de apertura que aseguraran tres cambios de dirección en el movimiento de la compuerta; esto son 0, 25, 15 y 50 cm. Los criterios para establecerlos fueron: a) partir desde la posición de cierre total; b) recorridos cortos para no modificar significativamente las cargas (magnitud y dirección) ni la ubicación relativa del centro de masa de la compuerta; c) por lo menos tres cambios en el sentido de movimiento: apertura→cierre, cierre→apertura y apertura→cierre; d) mayor sensibilidad a las cargas en brazos (flexión) y vástagos (tensión); e) menor tiempo posible.

⁹ Este fenómeno se debe a la diferencia que existe entre los coeficientes de expansión térmica de los materiales del espécimen y de la rejilla de la galga extensométrica.

¹⁰ <https://www.hbm.com/en/2261/mgcplus-data-acquisition-system/>

El recorrido de la prueba se muestra en la *Figura 4*. Se estimó una duración cercana a los 4 minutos sin contar el tiempo que toma la logística para iniciar cada movimiento.

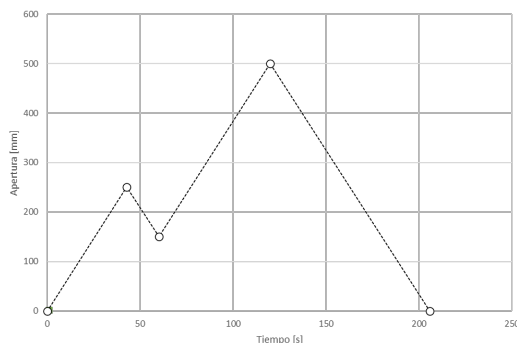


Figura 4. Recorrido de la apertura de la compuerta radial para prueba dinámica

4 Resultados

4.1 Efecto térmico

Se encontraron desviaciones en las lecturas de deformación unitaria de $0.1895 \mu\text{m}/\text{m}$ en testigo térmico para brazos y de $0.1845 \mu\text{m}/\text{m}$ en el testigo térmico para vástagos, valores que fueron desestimados teniendo en cuenta las incertidumbres de referencia obtenidas en pruebas de laboratorio bajo condiciones controladas ($0.2031 \mu\text{m}/\text{m}$). Cabe anotar que la prueba tuvo una duración aproximada de 10 minutos durante los que no se observó un cambio importante en las condiciones ambientales.

4.2 Presión adicional sobre la compuerta

De acuerdo con la fórmula de Westergaard [8], se puede estimar la sobrepresión del agua actuando sobre el asiento inferior de la compuerta en el caso de sismo, en función de la aceleración máxima del terreno, $0.29g$, la cota del agua sobre el umbral del vertedero en el nivel normal de operación, 24.00 m , y la altura del agua por encima del asiento de la compuerta en el nivel normal de operación, 19.91 m .

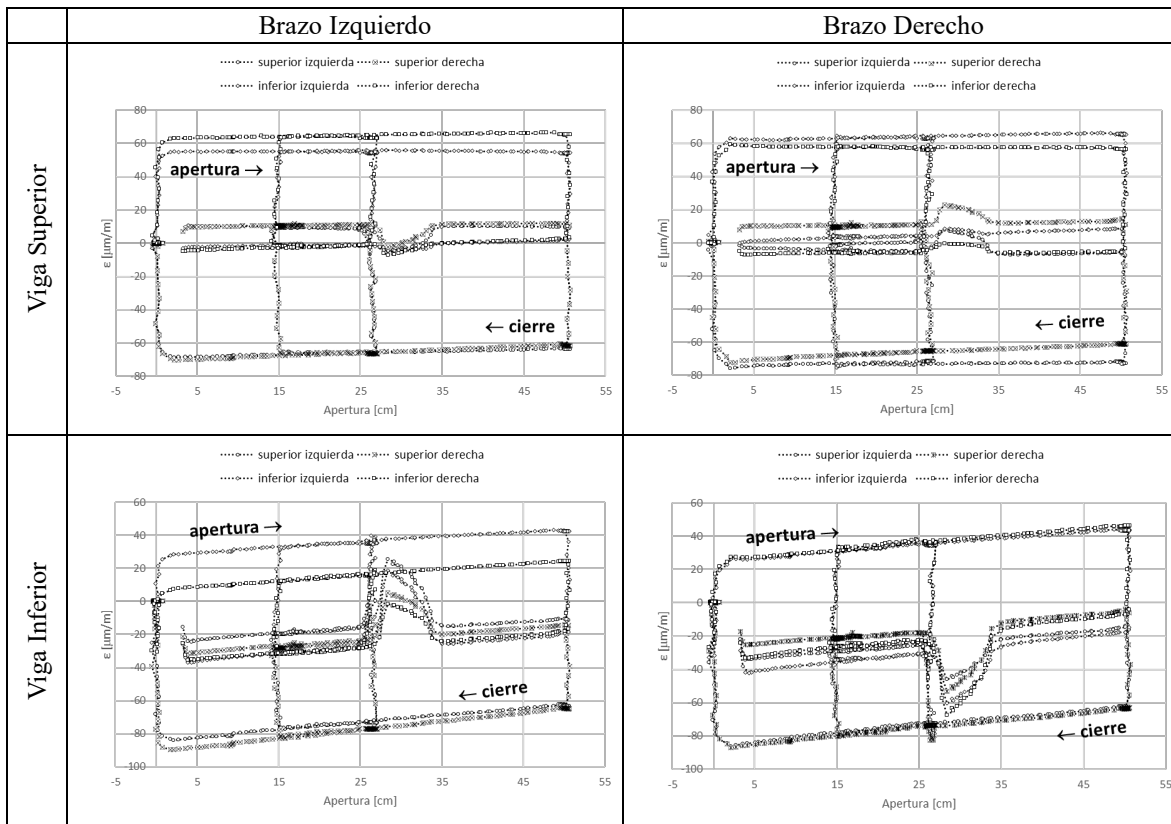
El resultado de aplicar la fórmula de Westergaard resulta en una sobrepresión equivalente a 5.55 m de cabeza de agua, es decir, que se puede representar el fenómeno considerando una altura del nivel del agua de $420.00 + 5.55 = 425.55 \text{ msnm}$. Este dato es importante para calcular los esfuerzos en las condiciones excepcionales debidas al sismo de los 500 años.

4.3 Vigas de los brazos

4.3.1 Deformaciones unitarias en los brazos

En la *Tabla 1* se presentan las deformaciones sufridas por cada una de las galgas instaladas en las vigas de los brazos. Cada galga tiene un marcador asociado. Para facilitar la lectura, las gráficas se ordenan con la posición (superior/inferior) y la lateralidad (derecha izquierda) del diseño. Adicionalmente, se utiliza el recorrido de la compuerta como variable independiente (abscisa) para apreciar la histéresis incitada por la fricción.

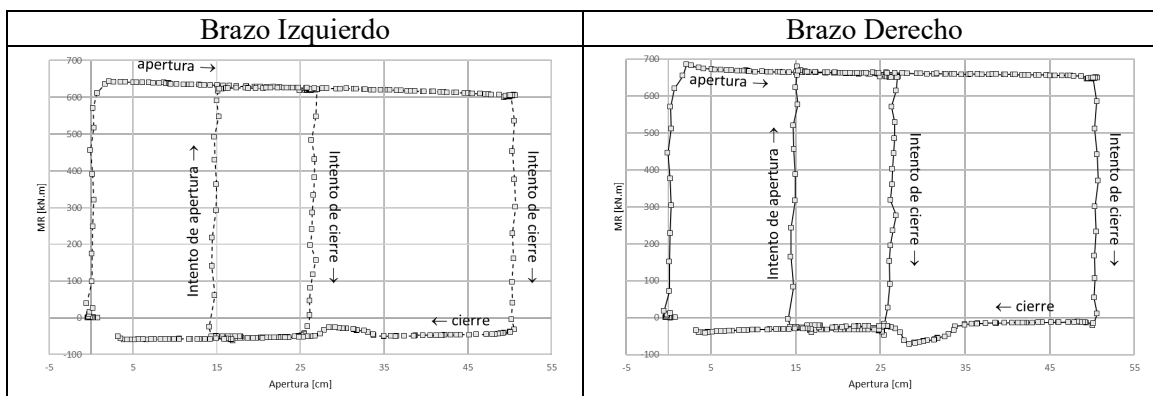
Tabla 1. Lecturas de deformación unitaria vs tiempo, para vigas superior e inferior de brazos izquierdo y derecho



4.3.2 Momentos resultantes en los brazos

La Tabla 2 presenta los resultados del modelo de cálculo 3.1.2. Se grafica el comportamiento del momento interno resultante M_R en la sección transversal en función de la apertura correspondiente de la compuerta para cada instante de tiempo. En esta representación se revela nuevamente la histéresis debida a la fricción. Los patrones verticales corresponden a las paradas, antes y después de cada movimiento. La primera parada se programó a los 25 cm de apertura, luego se cerró hasta detenerse a 15 cm de apertura, se volvió a abrir hasta una apertura de 50 cm donde se realizó la última parada para finalmente regresar a la posición de cierre total. Al cambiar el sentido del movimiento de la compuerta, el momento resultante cambia rápidamente hasta que logra vencer la fricción estática en el moñón y el deslizamiento se hace inminente.

Tabla 2. Momento flector resultante M_R en el muñón vs apertura de la compuerta, para brazos izquierdo y derecho.



4.4 Coeficientes de fricción estimados

De acuerdo con la metodología adoptada [3], el coeficiente de fricción se relaciona directamente con el momento interno resultante del brazo cerca al muñón, según:

$$\bar{M}_f = \frac{|M_R \uparrow - M_R \downarrow|}{2} \left(\frac{L_b}{L_b - 1.5l} \right) \left(\frac{1}{\cos \beta} \right)$$

$$\mu = \frac{\bar{M}_f}{r\bar{R}}$$

Los términos entre paréntesis corrigen por equilibrio estático, el momento en el muñón. El primero incluye el efecto del cortante interno resultante (sección 3.1.2) a partir de la longitud del brazo L_b y la posición de la sección instrumentada l , medida desde el muñón. El segundo, tiene en cuenta la inclinación de los brazos sobre el plano horizontal ($\beta=5.84^\circ$ para este caso). Se reportaron los siguientes coeficientes de fricción para la compuerta 4 de Hidroituango *Tabla 3*:

Tabla 3. Coeficientes de fricción reportados para la compuerta #4 de Hidroituango.

Cambio de movimiento (metros)	Coeficiente de fricción	
	Brazo izquierdo	Brazo derecho
0.25	0.34	0.34
0.15	0.33	0.34
0.50	0.35	0.35

4.5 Evaluación de la condición de estado estructural de brazos y vástagos

Para evaluar los niveles de esfuerzo en los brazos asociados al coeficiente de fricción estimado en 0.35 y para las condiciones máximas y excepcionales de operación, se modeló la compuerta en el software MIDAS gen 2023 ver 2.1. Se usaron elementos tipo viga en los brazos, en las vigas horizontales y verticales y en los rigidizadores horizontales. Esta última componente estructural, el marco que sostiene la cubierta, se modeló usando elementos tipo Shell. A cada uno de los elementos se les asignaron sus propiedades geométricas y de material reportadas en las memorias del diseño de la compuerta [9].

4.5.1 Esfuerzos de compresión máximos en los brazos

Se encontró que el esfuerzo axial máximo en los brazos es de 1728 kgf/cm^2 (169.46 MPa) para el embalse en 420.00 msnm + sismo de 500 años de periodo de retorno, en condición de reposo. Con el embalse en 421.59 msnm e iniciando la apertura de la compuerta. El esfuerzo axial máximo en los brazos es de 1640 kgf/cm^2 (160.83 MPa).

El esfuerzo admisible para las condiciones normales de operación [9] es de $0.6s_y = 2110 \text{ kgf/cm}^2$ y el esfuerzo máximo para un nivel del embalse de 421.59 msnm e iniciando la apertura, es de 1640 kgf/cm^2 , el 78% del admisible.

El esfuerzo admisible para condiciones excepcionales [9] es de $0.79s_y = 2778 \text{ kgf/cm}^2$ y el esfuerzo máximo para un nivel del embalse de 420.00 msnm + el sismo de 500 años de periodo de retorno y la compuerta en reposo, es de 1728 kgf/cm^2 , el 62% del admisible.

4.6 Vástagos de los cilindros hidráulicos

4.6.1 Cálculo de fuerzas en los vástagos

La Figura 5 muestra los resultados consolidados de fuerza en los vástagos durante las operaciones de apertura y cierre. Al revisar estos valores se tomó la decisión de utilizar un valor de 221 ton (2167.27 kN) de carga axial en cada uno de los vástagos para realizar los cálculos de esfuerzo.

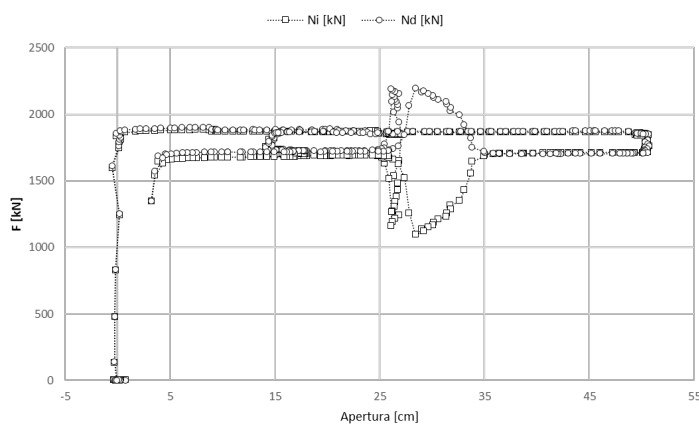


Figura 5. Resultados de medición en vástagos de servomotores

4.6.2 Estado de esfuerzos del vástago

Para las deformaciones unitarias medidas en las ubicaciones descritas en la *Figura 3* y asumiendo el módulo de elasticidad dado por el fabricante ($E = 206 \text{ GPa}$) se puede concluir que el vástago está sometido a un esfuerzo normal promedio de 41.2 MPa debido a la tensión, que al adicionar el efecto de la flexión se alcanzan valores localizados de 61.8 MPa. Así las cosas, el valor máximo de esfuerzo en la fibra externa es aproximadamente 62 MPa en la sección del vástago que posee un diámetro de 246 mm.

Con el valor de fuerza estimado se puede concluir que el esfuerzo máximo uniforme (sin concentración de esfuerzos) alcanza valores de 72 MPa en la sección donde se ubica la rosca. De acuerdo con el cálculo reportado en las memorias se observa un valor de 126 MPa. Ahora bien, es claro que ni los valores de la instrumentación, ni los cálculos descritos incluyen el valor de concentración de esfuerzos.

4.6.3 Fuerzas de tensión en los actuadores para condiciones de operación máximas y excepcionales

Si se considera que la máxima presión de diseño del aceite hidráulico es de 200 MPa, entonces la máxima tensión de los actuadores sería de 345.41 ton. Con esta fuerza, y considerando que el nivel del embalse está en la cota máxima, 421.59 msnm, los actuadores serían capaces de vencer un coeficiente de fricción en el muñón de 2.42.

Utilizando el modelo de cálculo para un coeficiente de fricción de 0.35, en diferentes niveles del embalse e iniciando la apertura de la compuerta, en la *Tabla 4* se muestran las tensiones en los actuadores.

Tabla 4. Tensión en los actuadores para un coeficiente de fricción de 0.35

Nivel del embalse (m.s.n.m)	Coeficiente de fricción 0.35	
	Tensión en actuadores (ton)	
420.00	216	Nivel normal de operación
421.59	221	Nivel superior de la compuerta
420.00 +sismo	232	Nivel considerando sismo 500 años

4.7 Esfuerzos máximos en zonas críticas de vástagos

Una vez se tienen los datos de tensión en el vástago y con el objetivo de tener más información sobre la condición de los esfuerzos en las zonas críticas, se analizan los esfuerzos mediante simulación computacional por el método de los elementos finitos, para determinar el estado de tensiones en los redondeos de las zonas de transición (zonas de cambios de sección cercanos a las horquillas de conexión con las compuertas).

4.7.1 Casos de carga

Se analiza un único caso de carga que corresponde a una carga axial en el extremo libre del sector del vástago correspondiente a la estimación realizada a partir de las mediciones realizadas en el sitio (2167.27 kN).

4.7.2 Geometría del vástago y de la rosca

La geometría base usada para generar los modelos CAD y maqueta numérica corresponde a la región resaltada en la parte izquierda de la *Figura 6*, la cual corresponde al extremo del vástago y es extraída desde el plano de diseño 300000092-D-0931 “Servomotor de las compuertas radiales” del fabricante.

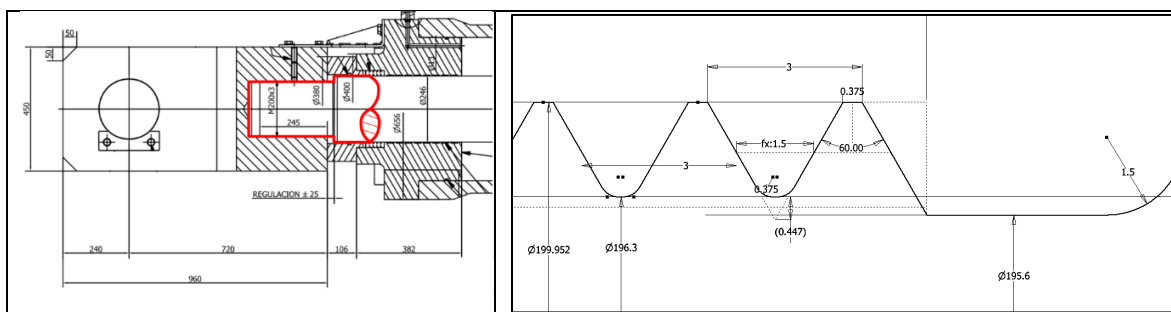


Figura 6. Geometría de la zona de interés del vástago de un servomotor (izq.) y dimensiones del perfil de rosca y zona de transición de diámetros del vástago (der.).

En la parte derecha de la figura se presentan las dimensiones del perfil de rosca y de la zona de transición de diámetros del vástago. El perfil de rosca corresponde a lo indicado en la norma ASME B1.13-2005 y las dimensiones indicadas en los planos y documentos de cálculo del fabricante.

4.7.3 Concentradores de esfuerzos

En la *Tabla 5* se presentan los valores para los concentradores de esfuerzo K_t encontrados a partir de la simulación. Adicionalmente, para condiciones de carga axial, sin tener en cuenta el componente de esfuerzo por flexión, la *Figura 7* muestra un valor máximo de esfuerzo alrededor de 343 MPa.

Tabla 5. Cálculo de concentradores de esfuerzo K_t .

Tipo de esfuerzo nominal calculado	Esfuerzo simulación	Carga homogénea	
Rosca. Axial, con área de diámetro mínimo de rosca de vástago	Von Mises	σ_{\max}	343.98 MPa
		σ_{nom}	71.60 MPa
		K_t	4.80
Hombro. Axial, con área del diámetro menor del hombro	Von Mises	σ_{\max}	338.67 MPa
		σ_{nom}	72.1 MPa
		K_t	4.70

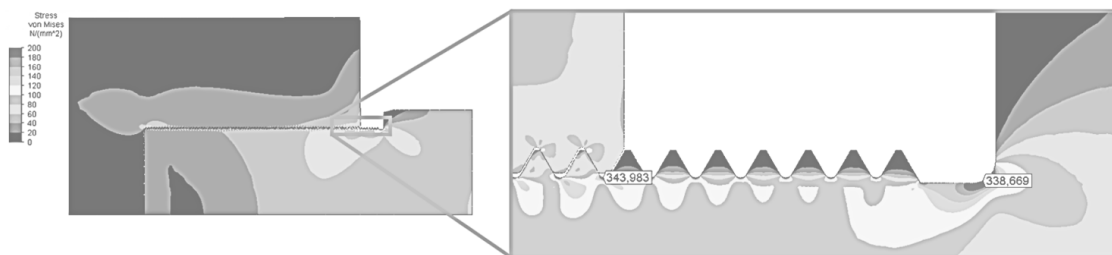


Figura 7. Estimación de esfuerzos por elementos finitos incluida la concentración de esfuerzos en la zona de transición de diámetro y de la rosca

Según los resultados de la simulación, el cálculo de esfuerzo con factores de concentración supera el esfuerzo admisible 0.4 σ_y descrito por la norma de referencia DIN 19704/76.

5 Conclusiones y Recomendaciones

Se implementó exitosamente una técnica no-invasiva para asistir la gestión del mantenimiento de las compuertas radiales del vertedero de la central Ituango. La validación se realizó en la compuerta #4 permitiendo detectar coeficientes de fricción simétricos en los cojinetes con valores superiores a los de diseño.

El coeficiente de fricción, μ , medido a partir de las deformaciones por flexión en los brazos durante la prueba, resultó ser de 0.35, un incremento de 133%, 2.33 veces el coeficiente de fricción usado para los cálculos de la compuerta, $\mu=0.15$ [9].

Coefficiente de fricción es el mismo en ambos muñones, lo que favorece que la distribución de cargas sea distribuida adecuadamente en ambos brazos y cilindros hidráulicos.

El impacto del incremento en el coeficiente de fricción en el muñón, en los esfuerzos de compresión máximos en los brazos es un poco mayor, del orden del 8.0%. En este caso es claro que el momento

flector en los brazos, alrededor del eje horizontal, se incrementa en la misma medida que se incrementa el coeficiente de fricción, 2.33 veces, pero la carga axial permanece casi constante pues esta proviene de las cargas hidrostáticas, y el momento flector alrededor del otro eje del brazo, también permanece constante porque este también proviene de las cargas hidrostáticas, así que una parte muy importante de los esfuerzos de compresión máximos en los brazos no son sensibles al incremento del coeficiente de fricción en el muñón. Como se indicó en los resultados, aun con el coeficiente de fricción $\mu=0.35$, los esfuerzos máximos en los brazos se mantienen alrededor del 80% de los esfuerzos admisibles.

El impacto en los componentes sensibles de la compuerta de este incremento en el coeficiente de fricción no es tan alto. Para el nivel de agua máximo de cálculo, 421.59 msnm, e iniciando la apertura de la compuerta, las fuerzas en los actuadores pasan de 207 ton para $\mu=0.15$ a 221 ton para $\mu=0.35$, un incremento del 6.7%. Esto se debe justamente a que un gran porcentaje de la fuerza en los cilindros hidráulicos, cerca del 96%, se usan para vencer el momento debido a la fricción en los sellos laterales y el momento debido al peso de la compuerta, y el resto para vencer la fricción en los muñones y sellos laterales.

Se recomienda monitorear la presión de operación de los cilindros hidráulicos, para identificar problemas en las compuertas. El instrumento de medida debe instalarse en la línea de entrada de aceite a la cámara de presión (apertura), para garantizar la menor afectación de la medida por la presencia de válvulas o bloque hidráulicos.

El cálculo de esfuerzos usando elementos finitos indica valores alrededor de 344 MPa en la rosca y alrededor de 339 MPa para el esfuerzo de Von-Misses en el hombro. Esto indica una concentración de esfuerzos importantes en estas dos secciones y se deben realizar análisis adicionales para determinar cómo mejorar esta condición.

Las simulaciones computacionales realizadas permitieron identificar la distribución de máximos esfuerzos en las zonas de interés las cuales se encuentran coherentes con las reportadas en literatura técnica y en estudios similares [5].

El análisis realizado, junto con el uso de metodologías analíticas, permitieron establecer un conjunto de valores del factor de concentración de esfuerzo aproximado, para la geometría particular del vástago evaluando en la zona del redondeo en el cambio de sección y para la zona de la raíz de los filetes de rosca.

La metodología implementada se configura como herramienta de diagnóstico importante, para evaluar las condiciones operativas de la compuerta, sin necesidad de realizar desmontajes complejos, desembalsar o afectar la generación de la central hidroeléctrica. Se considerará la inclusión de este procedimiento dentro de las rutinas de mantenimiento para determinar la evolución de los factores de fricción y como afectan el ciclo de vida de la compuerta. Adicionalmente, y tomando en cuenta los altos valores de esfuerzos concentrados, se pondrá a consideración la realización ensayos no destructivos para descartar la formación de grietas o manifestación de defectos que puedan apoyar la toma de decisiones sobre acciones correctivo-modificativas a lugar.

6 Referencias

- [1] V. R. J. David, «Metodología para el control de riesgos en compuertas radiales de descarga de fondo para grandes presas,» Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellin, 2013.
- [2] Skava Consulting, «Informe causa - raíz,» Medellin, 2019.
- [3] H. Føsker, «Strain gauge measurements of friction on radial dam gate bearings,» Norconsult AS, Sandvika, Norway.
- [4] R. G. a. C. Lima, «Ruptura del vástago del cilindro hidráulico de la compuerta N° 1 del vertedero de la central hidroeléctrica de Itaipú,» de *in IV Seminario del sector eléctrico paraguayo - Sistemas eléctricos de potencia*, Cigre, Paraguay, 2000.
- [5] D. C. Moreira, «Análisis de fallas del comportamiento de descarga de la central hidroeléctrica Tucuruí,» de *CEPEL. Relatório Técnico 526/2018*, RiodeJaneiro, 2018.
- [6] F. P. Beer, *Vector mechanics for engineers. Statics*, Boston: McGraw-Hill, 2013.
- [7] Hibbeler, *Mechanics of materials*, 10th ed. Pearson, 2014.
- [8] H. Westergaard, «Water pressures on dams during earthquakes,» *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 98, p. 418 a 433, 1933.
- [9] ATB Riva Calzoni, «Compuerta radial - Memoria de cálculo - 300000092-N-0803».