

# Simulación numérica del comportamiento termo-mecánico de estructuras de hormigón

Por los Ingenieros:  
**María Paula Zappitelli, Ignacio Villa y Claudio Rocco**

¿Es posible predecir la aparición de grietas y fisuras en grandes diques y otras mega estructuras hormigón?  
¿Se puede calcular con precisión en qué momento el material comenzará a deteriorarse para repararlo a tiempo?

## Introducción

Según el ACI 116R se considera hormigón masivo a cualquier volumen de hormigón con dimensiones lo suficientemente grandes como para requerir que se tomen medidas para hacer frente a la generación del calor debido al proceso de hidratación del cemento y a los cambios volumétricos con el objetivo de minimizar la fisuración. Las grandes dimensiones que presentan las estructuras de hormigón masivo originan las condiciones para que tengan lugar grandes cambios de temperatura en la estructura y gradientes de temperatura significativos de masa y superficie entre el interior y el exterior de la misma.

Estos cambios de temperatura van acompañados de cambios de volumen, los cuales son restringidos interna o externamente por las condiciones de emplazamiento, originando tensiones de tracción, si éstas superan la resistencia a tracción del material pueden provocar la aparición de fisuras de origen térmico. Si bien este tipo de fisuras están presentes en la mayoría de las estructuras de hormigón, en general no comprometen la estabilidad estructural pudiendo sin embargo en algunos casos afectar el comportamiento en servicio provocando su deterioro, con los consecuentes costos de reparación y mantenimiento, en particular significativos en el caso de obras de gran envergadura.

Para graficar la importancia del calor generado por el proceso de hidratación del cemento en estructuras de hormigón masivo cabe mencionar que un muro de 0.15m de espesor se estabiliza térmicamente aproximadamente en 1 hora o 1.5 horas, un muro de 1.5m de espesor lo hace en una semana. Sin embargo un muro de 15m de espesor, representativo del espesor de una presa tipo arco, requeriría 2 años para estabilizarse térmicamente. Por otro lado una presa de 152m de espesor necesitaría 200 años en alcanzar el mismo grado de estabilidad térmica. A medida que el espesor se incrementa la temperatura interior aumenta en la masa de hormigón volviéndose casi adiabático, generando el potencial desarrollo de grandes diferencias de temperatura, las cuales pueden comprometer la integridad estructural.

Frente a esta problemática la simulación numérica de estructuras de hormigón masivo, como presas y bases de fundación, empleando el Método de los Elementos Finitos constituye una poderosa herramienta para la toma de decisiones en lo que se refiere al cálculo y proceso constructivo de las mismas, ya que permite la determinación de los estados tensionales de estas estructuras frente a acciones de tipo térmico y así estudiar distintas alternativas en cuanto a secciones, secuencia de hormigonado, momento del año en el que es más conveniente comenzar con el mismo en relación al lugar de emplazamiento de la obra, contenido unitario de cemento a utilizar, potenciales zonas de fisuración, entre otros factores.

A continuación se presentan algunos análisis termomecánicos realizados aplicando el Método de los Elementos Finitos para distintas obras en donde se evidencia la relevancia de la información obtenida a partir de los mismos.

## Obras estudiadas

*Tapón y losa de fondo de una cámara de carga en provincia de Buenos Aires*

En este caso los objetivos de la simulación numérica consistieron en estimar la evolución térmica del tapón y la losa de fondo por efecto del calor de hidratación del cemento durante el hormigonado. Luego estudiar al campo de tensiones en

el tapón y la losa de fondo generado por la evolución térmica y finalmente determinar las zonas en las que la resistencia a tracción del hormigón es superada en el tapón y en la losa de fondo.

En la Figura 1 se presentan imágenes de la obra (superior) y del modelo numérico de la losa y el tapón de fondo (inferior).

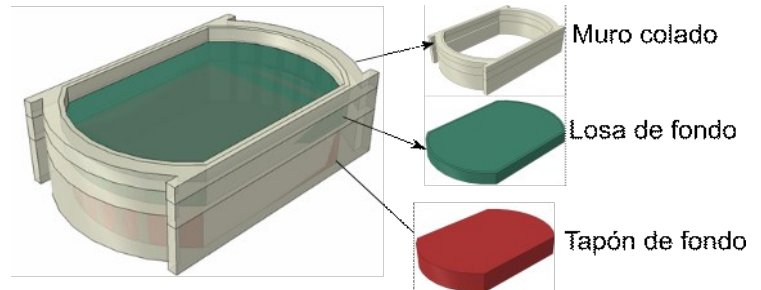


Figura 1. Obra del tapón y la losa de fondo (superior), modelo numérico (inferior)

Como resultado del análisis térmico se obtuvo en el caso del tapón de fondo que los valores máximos de temperatura ocurren a los 3 días en el centro del tapón y a los 8 días en el borde y el equilibrio térmico se alcanza a los 180 días, para todas las temperaturas de colocación analizadas. En el caso de la losa de fondo las mayores temperaturas tienen lugar en el centro de la misma, en particular al considerar una temperatura de colocación de 25°C. En la figura 2 se observan los contornos de temperatura obtenidos tanto para la losa como para el tapón de fondo

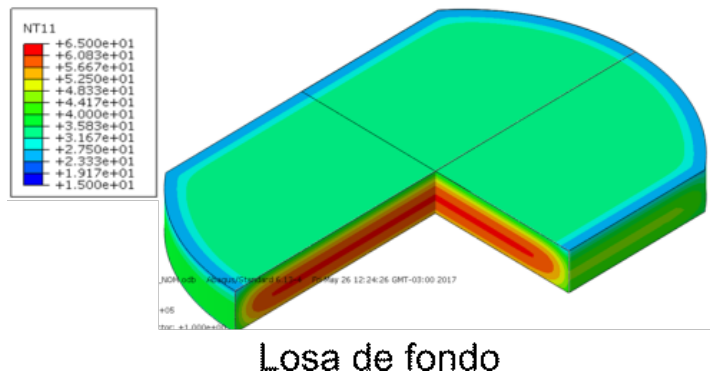
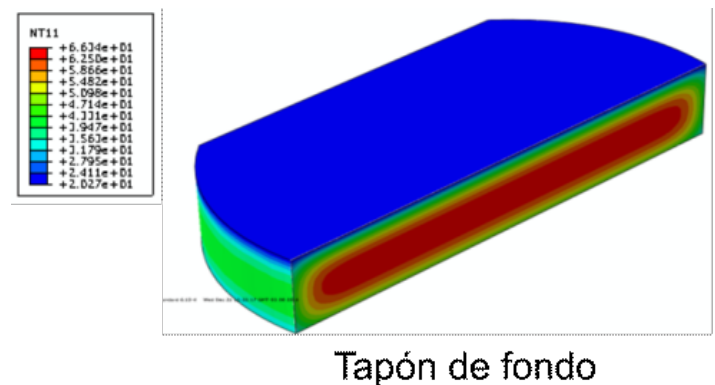


Figura 2. Contornos de temperatura para la losa y el tapón de fondo



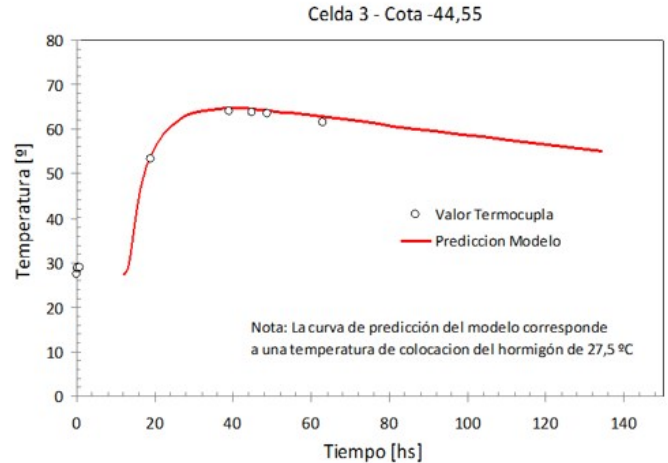
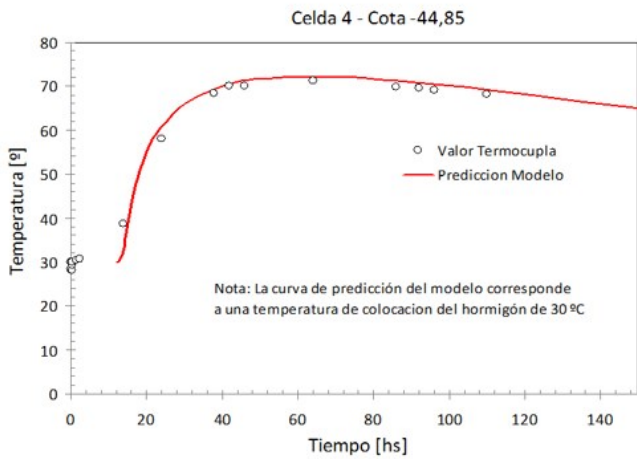
En el caso del tapón de fondo se colocaron termocuplas en



## HORMIGON

obra para el registro de temperaturas, en la Figura 3 se observa que los resultados del modelo numérico se ajustan adecuadamente a los obtenidos en obra.

Figura 3. Comparación entre las curvas de evolución de temperatura del hormigón predichas con el modelo térmico y valores de temperatura medidos con termocuplas embebidas en el hormigón



Como resultado del análisis mecánico se observó que en la cara superior del tapón de fondo las tensiones principales máximas superan la resistencia a tracción del material en el rango de 3 a 4 días luego el inicio del hormigonado, lo mismo ocurren en la cara inferior pero en el rango de 4 a 6 días, para todas las temperaturas de colocación analizadas. A su vez se pudo estimar que la profundidad de la zona traccionada era de 50cm respecto de los bordes superior e inferior, como se observa en la Figura 4 derecha, donde la zona comprimida se encuentra representada en color negro.

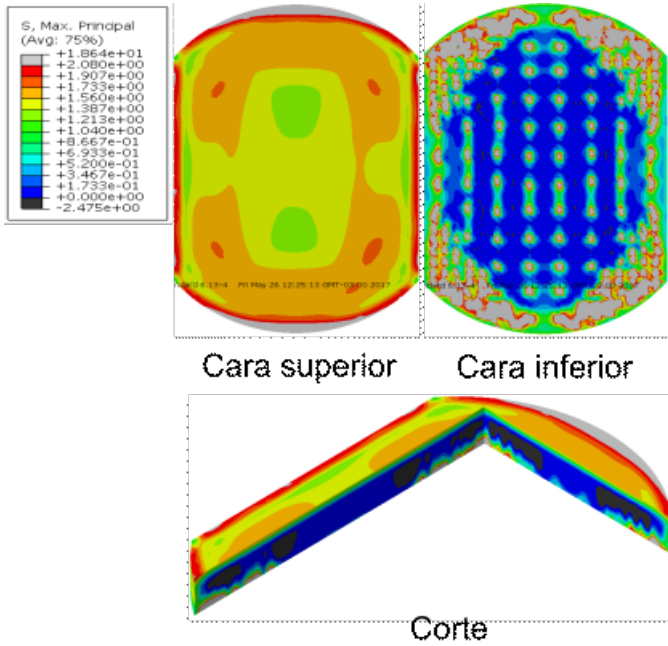
En la cara superior de la losa de fondo las zonas en donde se supera la resistencia a tracción se presentan en los extremos de la misma y en la cara inferior aparecen en correspondencia con los anclajes, en particular el tamaño de estas zonas es mayor cuando aumenta la temperatura de colocación. En la Figura 4 izquierda estas zonas están representadas en color gris. A su vez se observó que la profundidad de las zonas traccionadas es despreciable en la cara superior, pero en la cara inferior alcanza una profundidad de 27cm



**CÁMARA ARGENTINA  
DE LA CONSTRUCCIÓN  
DELEGACIÓN PROVINCIA DE BUENOS AIRES**

***“somos herramienta de Progreso”***

# HORMIGON



## Losa de fondo

Figura 4. Contornos de tensiones principales losa de fondo (izquierda), tapón de fondo (derecha)

A partir de l análisis numérico se pudo determinar que las máximas temperaturas en el hormigón se alcanzan los primeros días luego del hormigonado, independientemente de

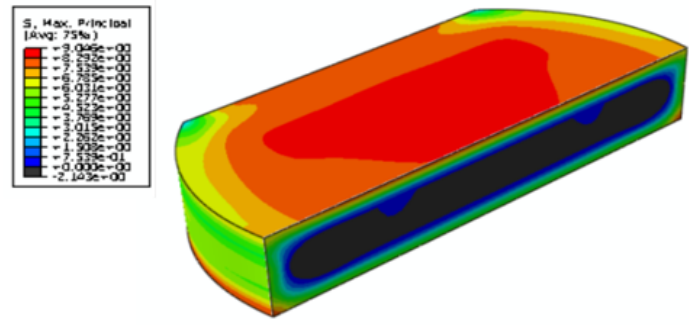
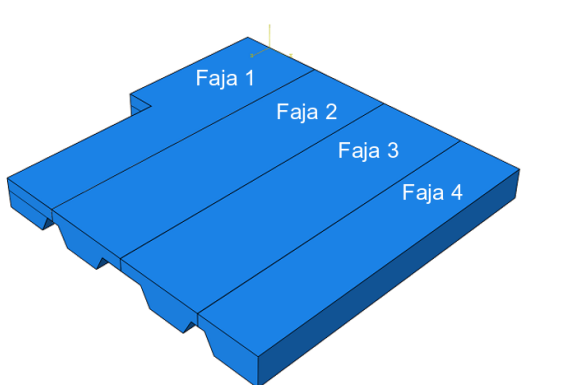
las temperaturas de colocación analizadas, y que en el tapón de fondo aparecerán fisuras en el rango de 3 a 6 días, pero las mismas son superficiales. En el caso de la losa de fondo se generarán fisuras en los extremos de la cara superior y en la cara inferior en la zona de anclajes debido a la concentración de tensiones, y en este caso también serán fisuras superficiales. Como resultado se observa que las fisuras generadas no afectarán el comportamiento estructural y pueden tomarse medidas para reducir su aparición.

## Base de fundación en provincia de Neuquén

El objetivo de la simulación numérica consistía en determinar la secuencia de hormigonado más adecuada para una base de fundación ubicada en la

provincia de Neuquén, cuyo modelo numérico se muestra en la Figura 5. Se pretendía determinar si resultaba más conveniente hormigonar siguiendo la secuencia 1-2-3-4 o 1-3-2-4, además de establecer el tiempo más adecuado entre hormigonado de una faja y la siguiente.

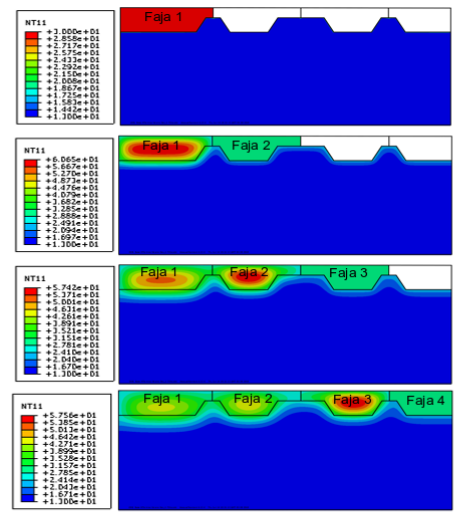
Figura 5. Modelo numérico de la base de fundación



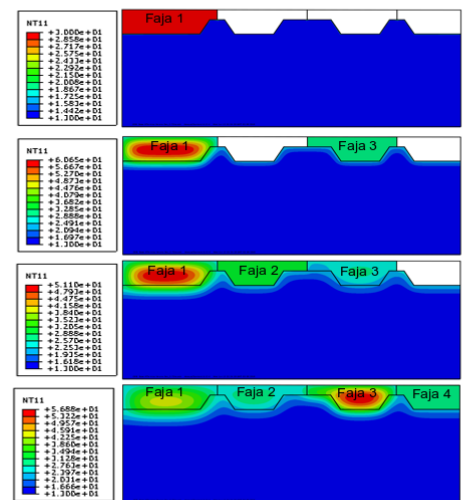
## Tapón de fondo

A partir del análisis térmico, Figura 6, se determinó que la secuencia de hormigonado 1-3-2-4 era la más adecuada, ya que las máximas temperaturas alcanzadas en este caso eran menores que para la otra secuencia propuesta.

Figura 6. Contornos de temperaturas para las secuencias de hormigonado analizadas



## Secuencia 1

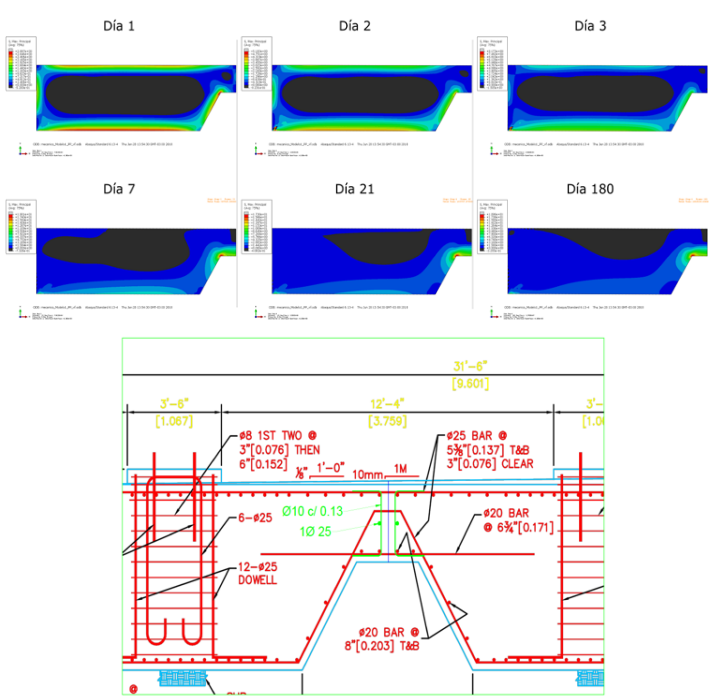


## Secuencia 2

A partir del análisis tensional se determinó que las zonas más comprometidas en cuanto a niveles tensionales y posible desarrollo de fisuras las constituían los puntos angulosos y las juntas entre fajas. Por este motivo se propuso una posible distribución de armaduras para las juntas con el objetivo de reducir la fisuración. En la Figura 7 se muestra la

evolución del análisis tensional para la faja 1, en donde las zonas comprimidas se representan en color negro, (superior) y la distribución de armadura propuesta (inferior).

Figura 7. Estado tensional faja 1 (superior), distribución de armadura propuesta (inferior) Bases de fundación en provincia de Buenos Aires



El objetivo del modelo numérico consistía en verificar la correcta realización del proceso de hormigonado efectuado en obra, para lo cual se llevó a cabo el análisis térmico de la base de fundación considerando las condiciones ambientales de la obra: temperatura ambiente, velocidad del viento, temperatura de colocación del hormigón. En la Figura 8 (izquierda) se observa la base de fundación luego del hormigonado y el modelo numérico (derecha)

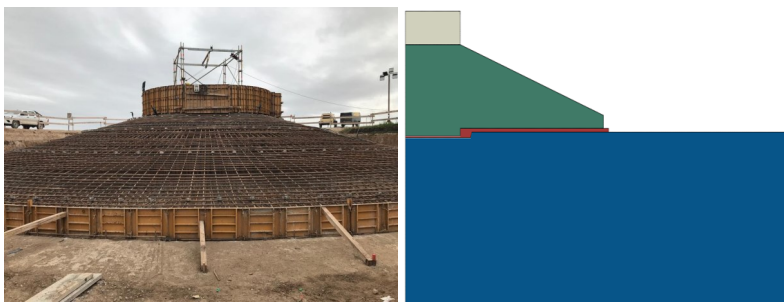
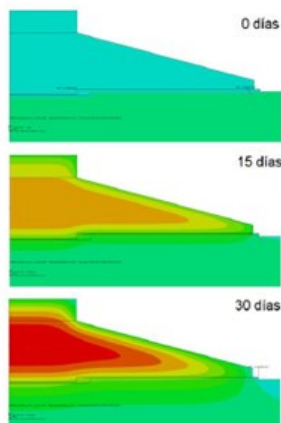
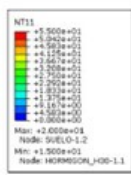


Figura 8. Base de fundación en obra (izquierda), modelado de la base de fundación (derecha)

Para el análisis térmico se realizaron simulaciones por un lado considerando la curva de elevación adiabática del hormigón como estado de cargas y por otro lado sin tenerla en cuenta, con el objetivo de representar una condición extrema en donde no se tomaran las medidas de protección en el caso de hormigonado en clima frío.

Figura 9. Evolución térmica de la base de fundación



Se observan los contornos de temperaturas para diferentes edades, las máximas temperaturas se alcanzan en el centro de la base.

A partir del análisis térmico se determinó que solo se producía congelamiento en una profundidad muy poco significativa en relación a las dimensiones de la base, incluso bajo condiciones de hormigonado desfavorables, como es el caso de no tomar medidas de protección adecuadas, esto puede observarse en la Figura 10, donde la zona de congelamiento se indica en color negro, a la izquierda se observan los resultados de la simulación considerando las medidas de protección y a la derecha sin tenerlas en cuenta.

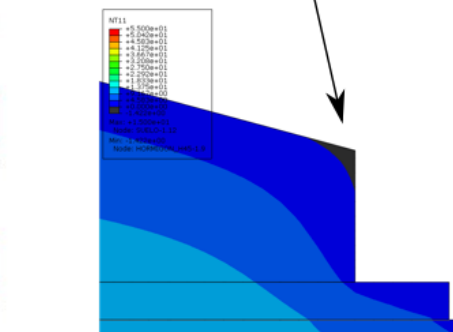
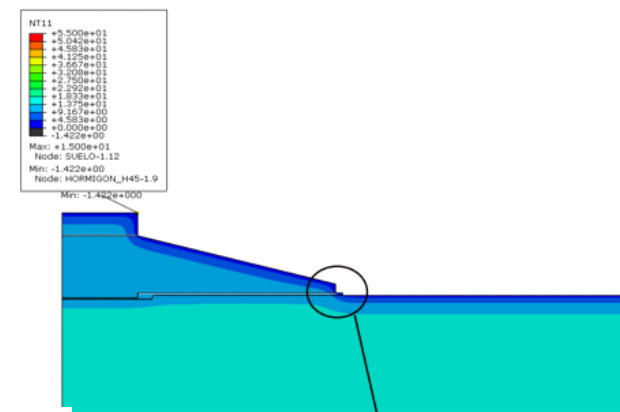
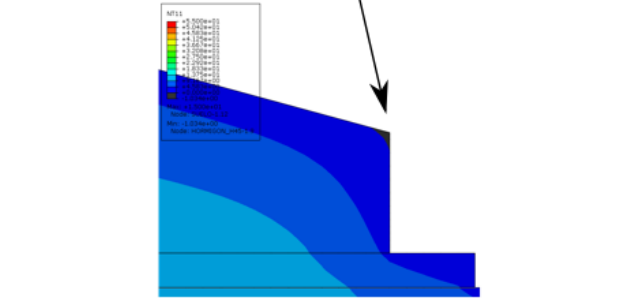
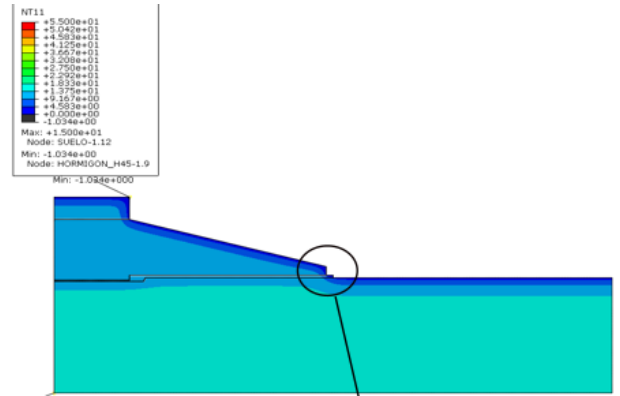


Figura 10. Evolución térmica de la base de fundación bajo condiciones extremas, adop-

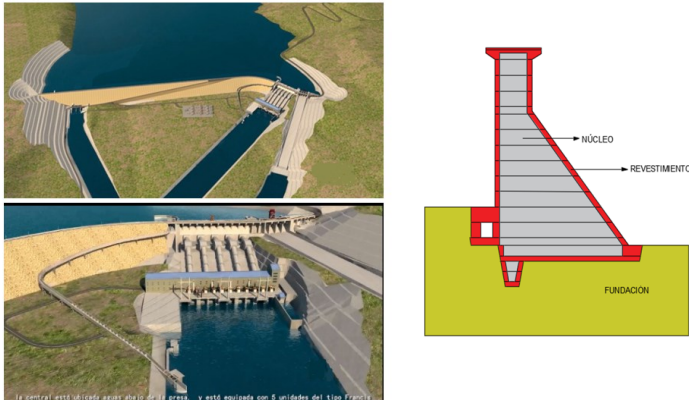


tando medidas de protección (izquierda) sin adoptar medidas de protección (derecha)

## Presas en provincia de Santa Cruz

En este caso se analizó la secuencia de hormigonado considerando hormigones con distinto contenido unitario de cemento y distintos momentos de inicio de la obra, invierno o verano, con el objetivo de determinar la condición más favorable para la ejecución de la misma. En la Figura 11 se observa el modelo digital de la presa (izquierda) y el modelo numérico (derecha).

Figura 11. Modelo digital de la presa (izquierda), modelo numérico (derecha)



Los resultados del análisis mecánico muestran que si bien en todos los casos analizados en algún punto de la estructura se supera el valor de la resistencia a tracción generando fisuras horizontales, zonas grises en la Figura 13, cuando se realiza el hormigonado cada 15 días el estado tensional desarrollado en la estructura resulta ser el más favorable.

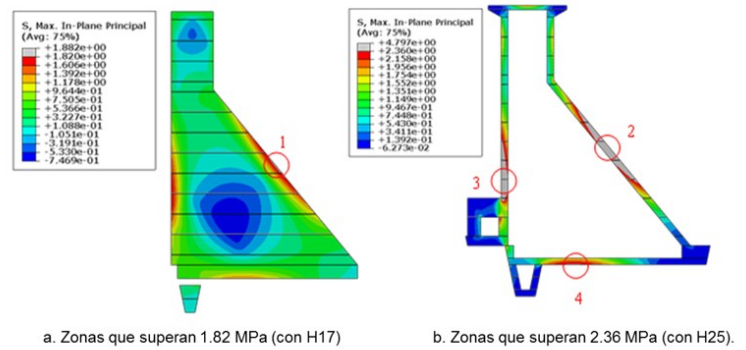


Figura 13. Estado tensional de la presa

A partir del análisis térmico evolutivo se observó que las temperaturas máximas alcanzadas considerando los distintos contenidos unitarios de cemento y distintos tiempos para el inicio de la obra son similares. En la Figura 12 se presenta el análisis térmico evolutivo de la presa

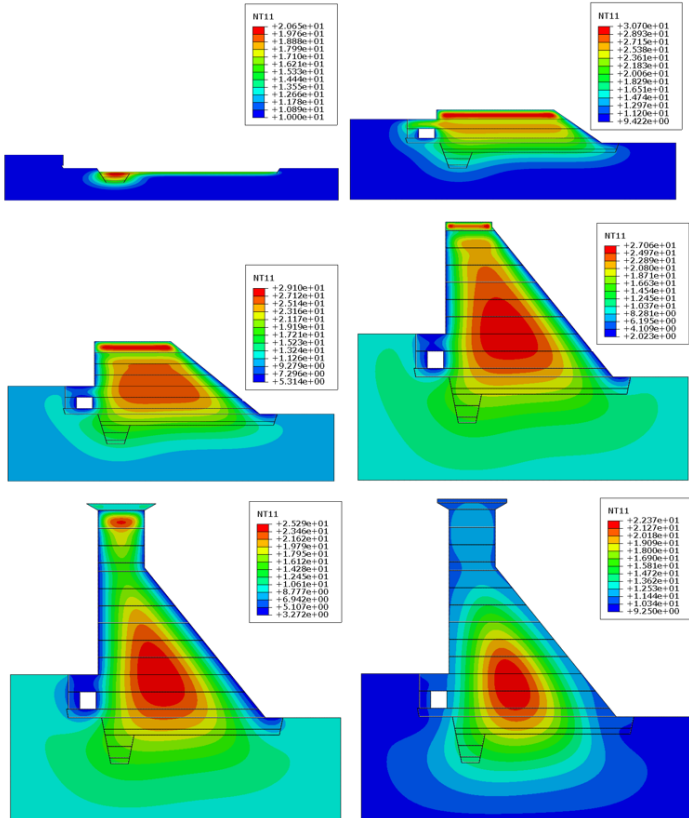


Figura 12. Análisis térmico evolutivo de la presa

## Conclusiones

En obras de gran envergadura de hormigón masivo, como presas y bases de fundación, la fisuración de origen térmico es un problema de considerable importancia. La simulación numérica del proceso de hormigonado en este tipo de obras constituye una poderosa herramienta, ya que pueden analizarse diversas alternativas en cuanto al diseño de las mezclas (contenido unitario de cemento), época del año más conveniente para la realización de la obra (invierno o verano), duración del proceso de hormigonado (tiempo transcurrido entre la realización de una tongada y la siguiente), comportamiento de la estructura frente a condiciones extremas (congelamiento, máximas temperaturas), ubicación de las posibles zonas fisuradas. La disponibilidad de información tan valiosa permite tomar medidas preventivas frente a la posible generación de fisuras, lo cual se traduce en una reducción de los costos de reparación y mantenimiento, los cuales resultan ampliamente significativos en este tipo de estructuras.

## RESEÑA DE LOS AUTORES

### **María Paula Zappitelli.**

Ingeniera civil, estudiante de la carrera de doctorado de la Facultad de Ingeniería de la UNLP, docente del Área Estructuras en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, investigadora de la UNLP.

UNLP, profesor del Área Estructuras en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, investigador de la UNLP.

### **Ignacio Villa.**

Ingeniero en construcciones, doctor en ingeniería por la Universidad Carlos III de Madrid, director ejecutivo del Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingeniería-

### **Claudio Rocco.**

Ingeniero civil, doctor en ingeniería por la Universidad Politécnica de Madrid, profesor del Área Materiales en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, investigador de la UNLP.



## REFERENCIAS

- ACI. ACI 207.2R-07 Report on Thermal and Volume Change Effects on Cracking of Mass Concrete. American concrete institute, 2007.
- ACI. Control of cracking in concrete structures (ACI 224R-01). American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2001.
- Metha P.K. y Monteiro P.J.M. Concreto, estructura, propiedades y materiales. Instituto mexicano del cemento y del concreto, A. C., 199



Ingeniería



Arquitectura



Agrimensura



Geología



Laboratorio de agua

E-mail: [jlmconsultoresasociados@gmail.com](mailto:jlmconsultoresasociados@gmail.com)

Web: [jlmconsultoresasociados.com](http://jlmconsultoresasociados.com)

Tel: 2215946694