

EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO MEDIANTE TÉCNICAS NUMÉRICAS PARA LA INTERVENCIÓN EN LA ESTRUCTURA DE UNA IGLESIA

EVALUATION AND DIAGNOSIS THROUGH TECHNIQUES NUMERICAL FOR THE INTERVENTION IN THE STRUCTURE OF A CHURCH

David Díaz Maimone^a, Raúl Bacchiarello^a, María H. Peralta^a y Leonel O. Pico^{a,b}

^aÁreas Estructuras y ^bMecánica, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires CIFICEN (CONICET-UNCPBA) Olavarría, Buenos Aires, Argentina.
david.diaz@fio.unicen.edu.ar, <http://www.fio.unicen.edu.ar>

Palabras clave: patología estructural, durabilidad, evaluación, modelos numéricos.

Resumen. Las estructuras laminares con arcos catenarios de hormigón fueron muy empleadas a mediados del siglo XX. Este tipo de estructuras se utilizaron para gimnasios, estadios cubiertos, templos e iglesias debido a sus grandes luces sin presencia de la interferencia visual que causan las columnas. En particular, en este trabajo se analiza el comportamiento de la estructura de una iglesia constituida por una lámina curva de hormigón armado apoyada en arcos. Estudios realizados en el año 2005 indicaron que la cubierta está afectada por un proceso de corrosión generalizado que origina su deterioro y que el grado de seguridad de la estructura debía evaluarse. Sobre esta base, se desarrolló un Plan de Actividades que incluyó la evaluación en el nivel material y en el nivel estructural mediante análisis numérico. En este trabajo se muestra el análisis estructural utilizando técnicas numéricas que permiten justificar, mediante el análisis tensional, la posibilidad de restituirle condiciones de uso adecuadas mediante la propuesta de una intervención. Los modelos numéricos permiten observar el comportamiento membranar con compresiones predominantes por lo cual la pérdida de armadura generada por el grado de corrosión no es determinante para la seguridad estructural.

Keywords: structural pathology, durability, evaluation, numerical models.

Abstract. Laminar structures with catenary concrete arches were widely used in the mid-twentieth century. These types of structures were used for gyms, indoor stadiums, temples and churches due to their large lights without the visual interference caused by the columns. In particular, this paper analyzes the behavior of a structure of a church constituted by a curved sheet of reinforced concrete supported by arches. Studies carried out in 2005 indicated that a generalized corrosion process that causes its deterioration and that the degree of safety of the structure must be evaluated. On this basis, an Plan of activities was developed that included the evaluation at the material level and at the structural level through numerical analysis. In this work, the structural analysis is shown using numerical techniques that allow justifying, the possibility of restoring suitable conditions of use by means of the proposal of an intervention. The numerical models allow us to observe the membrane behavior with predominant compressions, which is why the loss of steel of corrosion is not determinant for structural safety.

1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras laminares con arcos catenarios de hormigón fueron muy empleadas a mediados del siglo XX. En particular, este tipo de estructuras se utilizaron para gimnasios, estadios cubiertos, templos e iglesias debido a sus grandes luces sin presencia de la interferencia visual que causan las columnas. En 1964 se inició la construcción de un nuevo edificio de la Iglesia Nuestra Señora del Rosario, en María Ignacia, Partido de Tandil, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Su estructura es una lámina curva de hormigón armado apoyada en arcos. En el año 1985 se detectaron signos de deterioro con descascaramiento de recubrimiento de las armaduras en el interior por lo que se realizaron tareas de reparación según información recogida.

Estudios realizados en el año 2005 indicaron que la cubierta está afectada por un proceso de corrosión generalizado que origina su deterioro y que el grado de seguridad de la estructura debía evaluarse [Traversa y Zaccardi, \(2011\)](#). En dicho trabajo se analiza la composición del hormigón, se determina la existencia de iones cloruros utilizados como aceleradores de fraguado que provocan la corrosión de las armaduras, el % de pérdida del diámetro de las barras de acero, la humedad del hormigón, los espesores de recubrimiento, etc.

Sobre esta base, en 2017 la Facultad de Ingeniería de la UNCPBA desarrolló un Plan de Actividades que incluyó la evaluación en el nivel material y en el nivel estructural mediante análisis numérico. La estructura analizada, que constituye todo el edificio, es de hormigón armado y consta de una lámina curva constituida por losas y arcos. Esta tipología estructural era muy utilizada en la década del '60 del siglo pasado y existen otras iglesias en localidades de la provincia de Buenos Aires de las mismas características. La [Figura 1](#) muestra el exterior y el interior de la estructura de la iglesia analizada con mayor deterioro interno en el lado NO que en el SE.

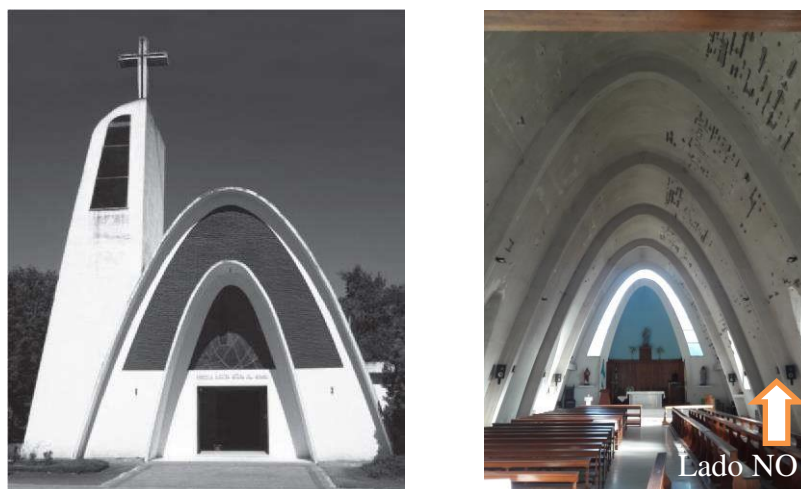


Figura 1: Vistas exterior e interior de la iglesia (diciembre de 2017).

En este trabajo se muestra lo actuado incluyendo el análisis estructural utilizando técnicas numéricas que permiten justificar, mediante el análisis tensional, la posibilidad de restituirle condiciones de uso adecuadas mediante la propuesta de una intervención. Los modelos numéricos permiten observar el comportamiento membranar con compresiones predominantes por lo cual la pérdida de armadura generada por el grado de corrosión no es determinante para la seguridad estructural.

2. METODOLOGÍA Y MODELOS DE ANÁLISIS

A efectos de realizar el análisis tensional se utilizaron modelos numéricos utilizando el Método de los Elementos Finitos, [Algor Software, \(2007\)](#). La geometría, materiales, cargas y discretización de los modelos se describen a continuación:

2.1 Geometría

Se efectuó el relevamiento geométrico de la estructura, la cual cuenta con un total de 7 vanos de láminas apoyadas sobre 8 arcos. La luz en la base, entre bordes internos extremos de un arco es de 11,088 m y la altura es de 10,5 m. La sección transversal de los arcos es de 0,30 m por 0,69 m. Los paños de lámina, que se apoyan sobre los arcos, tienen 0,10 m de espesor, y los arcos sobresalen 0,06 m del espesor de la lámina. La separación entre los arcos es de 4,70 m. A su vez, la estructura cuenta con aberturas (ventanas) en los paños intermedios, a ambos lados. La [Figura 2](#) muestra las dimensiones principales relevadas.

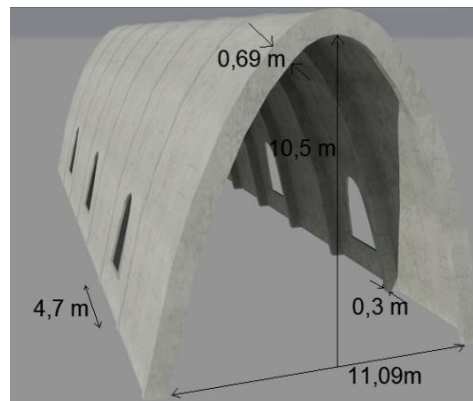


Figura 2: Geometría de la estructura.

2.2 Materiales

Se realizaron ensayos sobre testigos cilíndricos de 8,2 cm de altura por 10,3 cm de diámetro extraídos de la estructura de hormigón, [Figura 3](#). Se extrajeron testigos del lado NO y del SE de la estructura. Las resistencias obtenidas de los testigos de uno y otro lado de la nave son diferentes. Es probable que las losas se llenaran con hormigón vertido desde ambos lados para mantener en equilibrio el encofrado. El hormigón, por el lugar (localidad rural, pequeña) y la época, debe haberse dosificado en volumen dado que no se contaba con plantas dosificadoras en peso u hormigón elaborado. Con las dosificaciones en volumen existen diferencias entre pastones que pueden resultar muy variables. Estudios sobre esas variaciones en la resistencia del hormigón han determinado que la precisión puede llegar a ser de $\pm 40\%$ del valor medio, [Cabrera O. A. \(1991\)](#). Por tal motivo, la calidad del hormigón producido en el lado NO puede haber diferido del elaborado en el sector SE por el método de dosificación, la calidad de la mano de obra, diferencias en los materiales, curado, etc. Esto podría justificar la diferencia de la calidad entre ambos sectores de la losa y por lo tanto el mayor grado de afectación del acero de refuerzo del lado NO respecto del SE.

A los efectos de los modelos y para estar del lado de la seguridad, se adopta la menor resistencia característica de compresión obtenida de 17,5 MPa (H-17). De este modo, según [CIRSOC 201 \(2005\)](#), la resistencia máxima de tracción está dada por la Ec. (1).

$$f_r = 0.625 (f'_c)^{0.5} \quad (1)$$

donde f_r es la resistencia máxima de tracción en MPa y f'_c es la resistencia característica de compresión en MPa. En consecuencia, la f_r es 2,57 MPa. El acero relevado en la estructura de hormigón armado es ADN-420.



Figura 3: Testigo cilíndrico obtenido de la estructura.

2.3 Estado de cargas

Se consideraron las cargas permanentes y de viento de la zona de acuerdo a los Reglamentos Argentinos [CIRSOC 101 y 102 \(2005\)](#). Para obtener las cargas de viento que actúan sobre la estructura, se utilizó un simulador de túnel de viento del software Autodesk Flow Design. Este software utiliza Fluidodinámica Computacional (CFD, Computational Fluid Dynamics) empleándose el Método de Volúmenes Finitos y modelándose la turbulencia del campo de fluido mediante LES-Smagorinsky (Large Eddy Simulation). De este modo se obtuvieron las presiones resultantes considerando una velocidad máxima de viento de 30 m/s (108 km/h). En la [Figura 4](#) se observa la simulación fluidodinámica del viento actuante sobre la estructura.

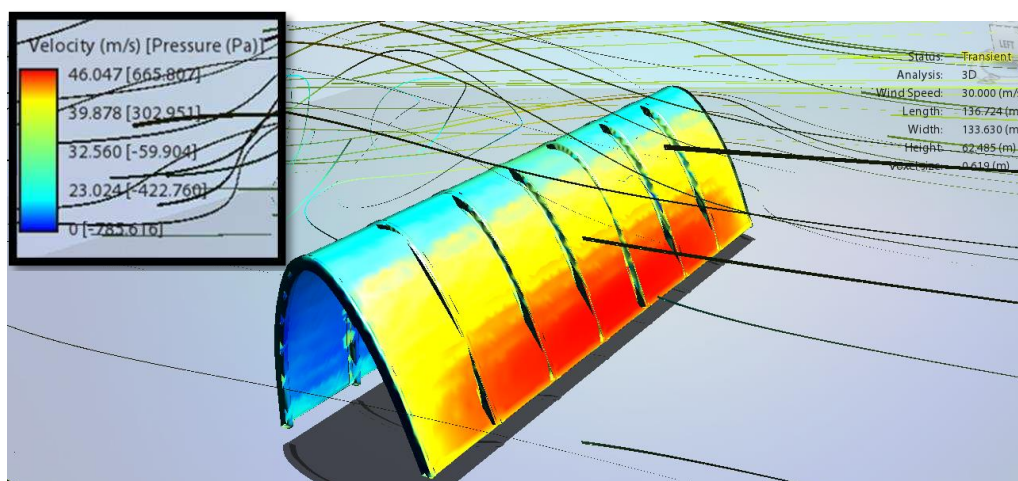


Figura 4: Simulación fluidodinámica del viento.

Los resultados obtenidos de presiones de viento indican que la presión de viento máxima es de 666 Pa y la de succión de -785 Pa, lo que se corresponde con resultados obtenidos de experiencias similares con edificaciones de la zona. En la [Figura 5](#) se ilustra la distribución de presiones debidas a la acción de viento lateral en la cara posterior.

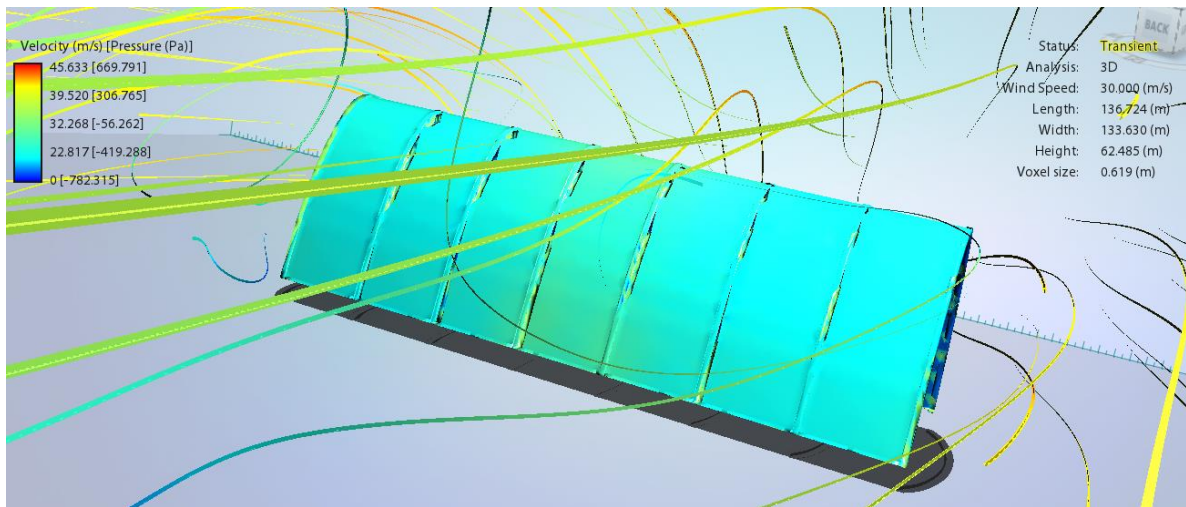


Figura 5: Distribución de presiones debida a la acción de viento lateral.

2.4 Modelo de elementos finitos

El análisis numérico se efectuó con el software Algor, utilizando para la discretización elemento tipo sólido tridimensional isoparamétrico de ocho nodos. Se efectuó el análisis estático utilizando modelo material elástico lineal, [Spyrakos, C., Raftoyiannis J. \(1997\)](#). Considerando la geometría, las características de los materiales y las cargas antes indicadas se efectuó el análisis estático sobre el modelo de elementos finitos discretizado con una malla de 16956 elementos, según se indica en [Figura 6](#).

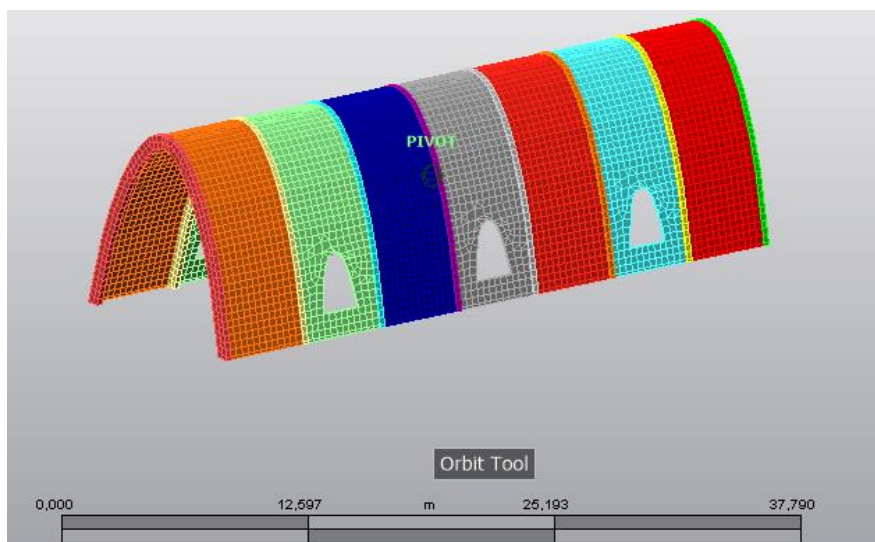


Figura 6: Modelo geométrico para análisis estructural.

3. RESULTADOS OBTENIDOS

Para evaluar el grado de compromiso estructural se obtuvieron los resultados de tensiones máximas y mínimas principales que se muestran en la [Tabla 1](#), estos resultados indican que en ningún punto de la estructura se superan las tensiones de rotura de tracción y compresión para la combinación de cargas indicadas en 2.3.

Tensión	Valor máximo de tensión [MPa]	Valor mínimo de tensión [MPa]
Tensiones máximas principales	2,07	-0,35
Tensiones mínimas principales	0,06	-3,84

Tabla 1: Tensiones principales.

En la [Tabla 2](#) se muestran los resultados obtenidos de tensiones en caras interna (CI) y externa (CE) de la lámina en las direcciones longitudinal (paralelo al eje de la nave) y transversal. Asimismo, se indican los esfuerzos axiales y de flexión. En las [Figura 7](#) y [Figura 8](#) se observa la distribución de tensiones longitudinales y transversales en los modelos analizados siendo la dirección transversal la de las mayores tensiones. En la [Figura 9](#) se muestra la distribución de esfuerzos axiales transversales con predominio de compresión.

Direcciones analizadas	Tensión CI [MPa]	Tensión CE [MPa]	Axil [kN/m]	Momento [kN/m]
Longitudinal (tramo)	0,22	-0,30	-4,10	0,43
Longitudinal (apoyo)	-0,77	0,63	-7,10	-1,17
Transversal	-1,55	0,93	-31,40	2,08

Tabla 2: Tensiones y esfuerzos internos.

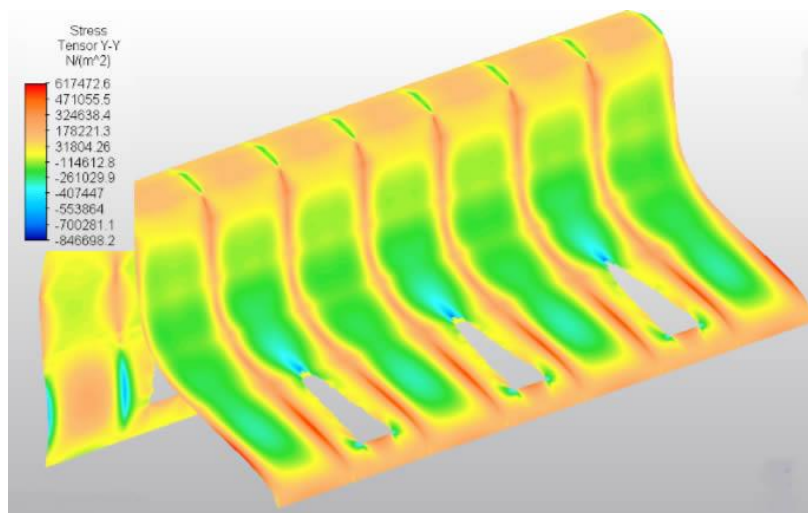


Figura 7: Tensiones longitudinales.

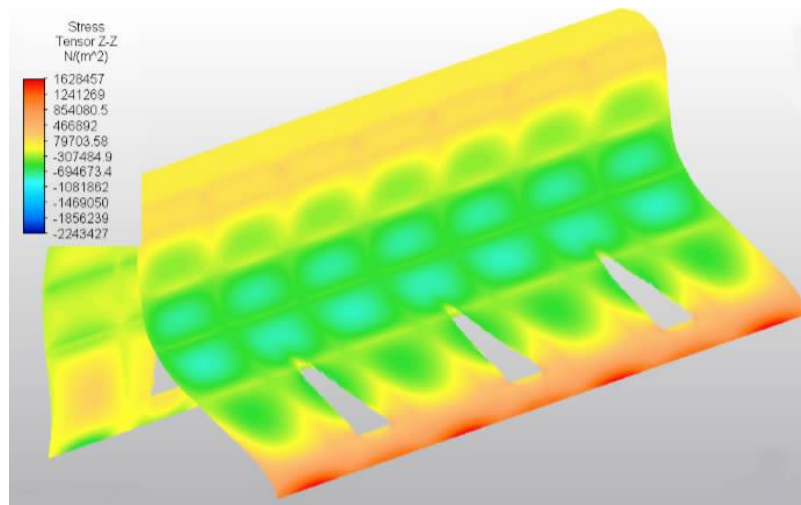


Figura 8: Tensiones transversales.

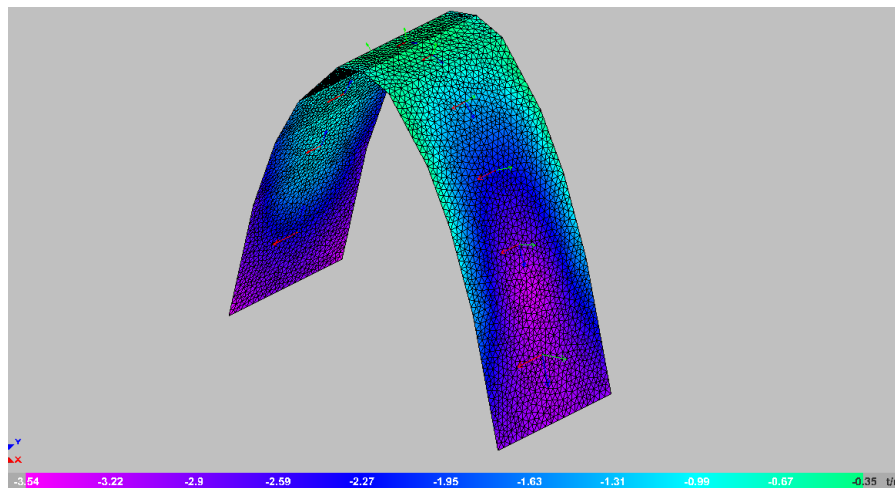


Figura 9: Esfuerzo axial.

Los resultados obtenidos permiten observar las tensiones en ambas caras de la lámina. Generalmente, los valores absolutos de estas tensiones no son iguales. Esta diferencia se debe a la influencia de un esfuerzo de flexión mínimo y del esfuerzo axial generando flexión compuesta.

Para el cálculo de los esfuerzos se trabajó con otro modelo utilizando elemento placa, Figura 9. A modo de ejemplo, en Figura 10 y Ecs. (2) y (3), se realiza el cálculo para desacoplar las tensiones y poder analizar los valores de momentos y esfuerzos axiales en la dirección transversal.

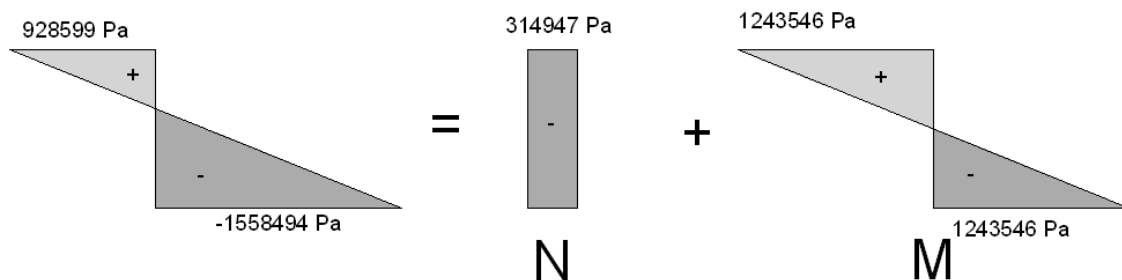


Figura 10: Desacople de tensiones normales en la dirección transversal

$$\frac{928599 Pa + 1558494 Pa}{2} = 1243546 Pa \rightarrow \text{Tensiones debido sólo al momento} \quad (2)$$

$$1558494 Pa - 1243546 Pa = 314947 Pa \rightarrow \text{Tensiones debido al Axil} \quad (3)$$

Para obtener el momento que generan estas tensiones, es sabido que las mismas integradas a través del área otorgarán fuerzas. Estas fuerzas generan un par momento interno que debe ser equivalente al momento total externo. En cuanto al esfuerzo axil, la tensión debe multiplicarse por el área de la lámina.

Se calcularon las armaduras necesarias a partir de los esfuerzos más desfavorables de la [Tabla 2](#). Por otra parte se calculó la armadura mínima necesaria por reglamento [CIRSOC 201 \(2005\)](#) utilizando la E_c (4).

$$A_{s_{min}} = 0,0018 \times 10 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} = 1,8 \text{ cm}^2/\text{m} \quad (4)$$

De la comparación entre la armadura necesaria y la mínima, resultó que la mínima es mayor que la necesaria.

El armado relevado en la dirección longitudinal es de 1 ϕ 12 cada 25 cm en ambas caras, lo que arroja una cuantía de 4,53 cm^2/m en cada cara o un total de 9,05 cm^2/m . En la dirección transversal el armado relevado es de 1 ϕ 6 cada 25 cm, equivalente a 2,01 cm^2/m en cada cara o un total de 4,02 cm^2/m . En ambos casos la armadura existente es mayor que la mínima requerida por lo cual se puede indicar que, aún con una pérdida de sección del 50 % para las armaduras transversales, se estaría cumpliendo con los requerimientos de cuantía mínima y, que la estructura, de acuerdo al análisis efectuado, tiene un comportamiento no comprometido por el deterioro observado.

4. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos y analizados en este estudio permiten indicar que no existe riesgo estructural significativo por el deterioro observado. Sí es necesario atender y efectuar las reparaciones por la posible afectación a las personas en caso de desprendimientos de recubrimientos y para evitar daños mayores. Se sugiere intervenir la estructura siguiendo los pasos que a continuación se indican:

- 1) Realizar la impermeabilización externa de la cubierta mediante la colocación de una membrana u otra acción conveniente al efecto.
- 2) Efectuar una limpieza de la superficie de la cara interna noroeste de las losas, retirando recubrimientos deteriorados.
- 3) Efectuar la limpieza del óxido de las armaduras expuestas mediante un arenado.
- 4) Restablecer el recubrimiento de la armadura mediante un mortero proyectado cuya dosificación incluya algún inhibidor de corrosión. El espesor mínimo será de 2 cm. Deberá atenderse la adherencia utilizando, al efecto, algún producto comercial adecuado y/o colocar una malla de 1 ϕ 6 cada 15 cm fijada a la losa previamente a la proyección del mortero.
- 5) Efectuar inspecciones periódicas para detectar nuevos signos de corrosión y darles el tratamiento adecuado en tiempo y forma.
- 6) Realizar tareas de inspección y mantenimiento periódicas de la membrana, para evitar el ingreso del agua a la estructura.

REFERENCIAS

- Algor Software V.20.3. Finite Element Analysis Software, 2007.
- Autodesk Flow Design, Computational Fluid Dynamics. Software libre. V. 2014
- Cabrera, O.A, Heriz, J.M., Dosificación por volumen de hormigones con agregados de trituración, Proc. 10ª Reunión Técnica de la AATH, “Ing. Juan F. García Balado” - Tomo 1 - pp. 165-174., 1991.
- CIRSOC 101. Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas mínimas de Diseño para edificios y otras estructuras, 2005.
- CIRSOC 102. Reglamento Argentino de Acción del Viento sobre las Construcciones, 2005.
- CIRSOC 201. Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón, 2005.
- Spyrakos, C., Raftoyiannis, J. Linear and nonlinear finite element. Analysis in engineering practice. Algor Publishing Division, 1997.
- Traversa, L., Zaccardi. Patrimonio Religioso en Colonias, Pueblos y localidades de la provincia de Buenos Aires. Anales LEMIT, Serie III, pp. 87-95. La Plata. Argentina, 2011.