

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE BÓVEDAS Y CÚPULA DE LA ESTANCIA JESUÍTICA SANTA CATALINA

Gómez, José Luis¹; Ruata, María Edel²; Nicasio, Cecilia³; Klein, Karin⁴
¹Ingeniero, Univ. Nacional de Córdoba, e-mail: ccp-cons@ciudad.com.ar
²Arquitecta, Univ. Nac. de Córdoba, e-mail: piniruata@hotmail.com
³Ingeniera, Univ. Nac. de Córdoba, e-mail: cecilia.nicasio@gmail.com
⁴Arquitecta, Univ. Nac. de Córdoba, e-mail: karinklein_2k@hotmail.com

RESUMEN

Como continuidad a trabajos de investigación anteriores, que abordaron el análisis del comportamiento estructural de edificios de importante valor patrimonial, como son las Estancias Jesuíticas de la Provincia de Córdoba, en este trabajo se muestra el estudio realizado para evaluar el comportamiento estructural de la cúpula y bóveda de la Iglesia Jesuítica Santa Catalina, así como de las bóvedas del noviciado y de una de las habitaciones ubicada sobre el patio principal de la Estancia, con manifestación de fisuras.

Se describen las tareas realizadas previas al análisis tensional, que incluyeron un relevamiento planialtimétrico general de la Estancia mediante estación total, a efectos de confeccionar los planos digitalizados y fundamentalmente, determinar los espesores de las bóvedas y cúpula del crucero. Se realizaron también dos pozos tangenciales para analizar las características del suelo y profundidad de las fundaciones.

La verificación seccional se realizó con el software Algor, de análisis por elementos finitos, a partir de modelos sólidos de CAD.

Los resultados de estos estudios, permitieron evaluar la seguridad de la estructura de bóvedas y cúpula, y proponer actuaciones para la preservación y mantenimiento de este edificio que integra el conjunto de Estancias Jesuíticas declaradas patrimonio cultural de la humanidad por la Unesco.

ABSTRACT

As a continuation of previous research, which addressed the analysis of the structural behavior of buildings of important patrimonial value, such as the Jesuit Estancias of Córdoba Province, this paper shows the study to evaluate the structural behavior of the dome and vault of the Santa Catalina Jesuit Church and the vaults of the novitiate and one of the rooms located on the main patio of the ranch, with manifestation of cracks.

It describes the tasks performed prior to the stress analysis, which included a general survey by total station, in order to make scanned blueprints and fundamentally determine the thickness of the vaults and dome of the transept. There were also two wells tangential to analyze soil characteristics and depth of foundations. The sectional verification was performed with finite element analysis Algor software, from CAD solid models.

The results of these studies allow assessing the safety of the structure of vaults and dome, and propose actions for the preservation and maintenance of this building that integrates the Jesuit Estancias group, declared cultural heritage of humanity by UNESCO.

INTRODUCCIÓN

En el marco de las investigaciones realizadas en los últimos años en el Taller de Investigación de Diseño Estructural de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional de Córdoba, se presenta este trabajo con el estudio de las tipologías estructurales de mampostería utilizadas por los Jesuitas en la construcción de la Estancia Santa Catalina.

La Estancia Santa Catalina, que integra el conjunto de estancias jesuíticas declaradas Patrimonio de la Humanidad en 2000, por la UNESCO, comprende la iglesia, la residencia con sus tres patios y locales anexos, el noviciado, las ruinas de la ranchería (habitaciones para esclavos), el tajamar, restos de acequias y molinos. Figura 1



Figura 1. Vista de la estancia

Se halla enclavada en un paraje rural a unos 20 kilómetros de la ciudad de Jesús María y a 70 km de la ciudad de Córdoba, desde donde se accede por ruta nacional N°9 y luego por camino de tierra.

Conservada casi en su totalidad, es la más amplia de todas las Estancias, y la única que permanece bajo dominio privado.

Su Iglesia, de gran cúpula y atrio sobre elevado, denota una cierta influencia del barroco centroeuropeo, tanto en el empleo de las pilastras y frontones curvos que enmarcan el portal de acceso como en las torres gemelas que flanquean la fachada. (Figura 2).



Figura 2. Fachada principal

El interior de la Iglesia, tiene una sola nave que culmina en la cúpula sobre el crucero, destacándose el gran retablo del altar mayor, tallado en madera y dorado. Junto a la iglesia se halla el antiguo cementerio de los religiosos.

Se destacan también la Residencia Jesuítica, estructurada en torno a los tres patios, y el edificio del Noviciado, donde puede observarse con claridad la técnica constructiva de mampostería utilizada por los Jesuitas. (Figuras 3 y 4).



Figura 3. Patios de los Esclavos y Principal

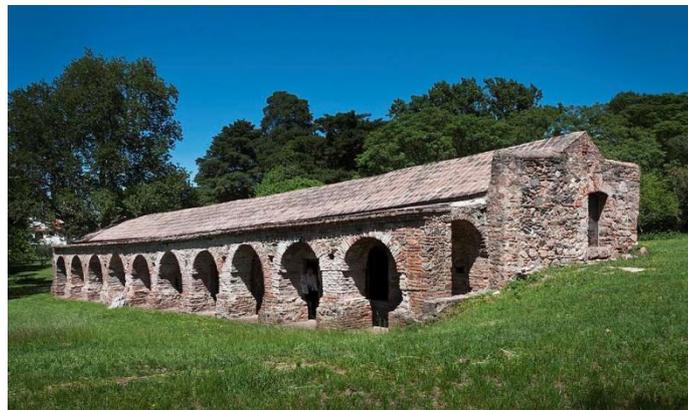


Figura 4. Edificio del Noviciado

ESTUDIOS REALIZADOS

La necesidad de obtener datos sobre los espesores de las bóvedas de los diferentes sectores de la Estancia y de la cúpula de la Iglesia, decidió la realización de un relevamiento planialtimétrico completo de la Estancia mediante estación total, con la asistencia de un equipo de topógrafos. Dicho relevamiento fue también aprovechado para la confección de planos y cortes, ya que los existentes no resultaron confiables en una primera comparación con las mediciones en obra. (Figura 5)

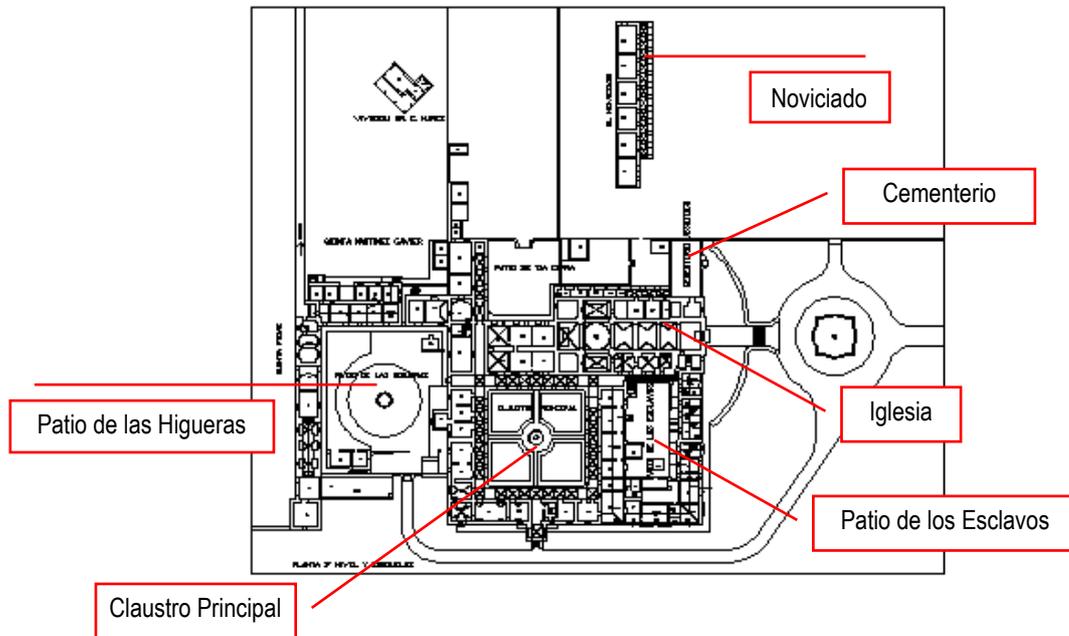


Figura 5. Planta general - Primer Nivel

Se realizaron también dos pozos tangentes a la cimentación con el objeto de dilucidar el tipo de fundación, la profundidad de la misma y conocer a esa profundidad, la capacidad portante del terreno.

VERIFICACIÓN TENSIONAL DE LA CÚPULA

En el relevamiento visual de fisuras no se evidenciaron patologías de este tipo dentro de la Iglesia, tanto en la bóveda que constituye la nave, como en la cúpula que conforma el crucero de la misma. (Figura 6)

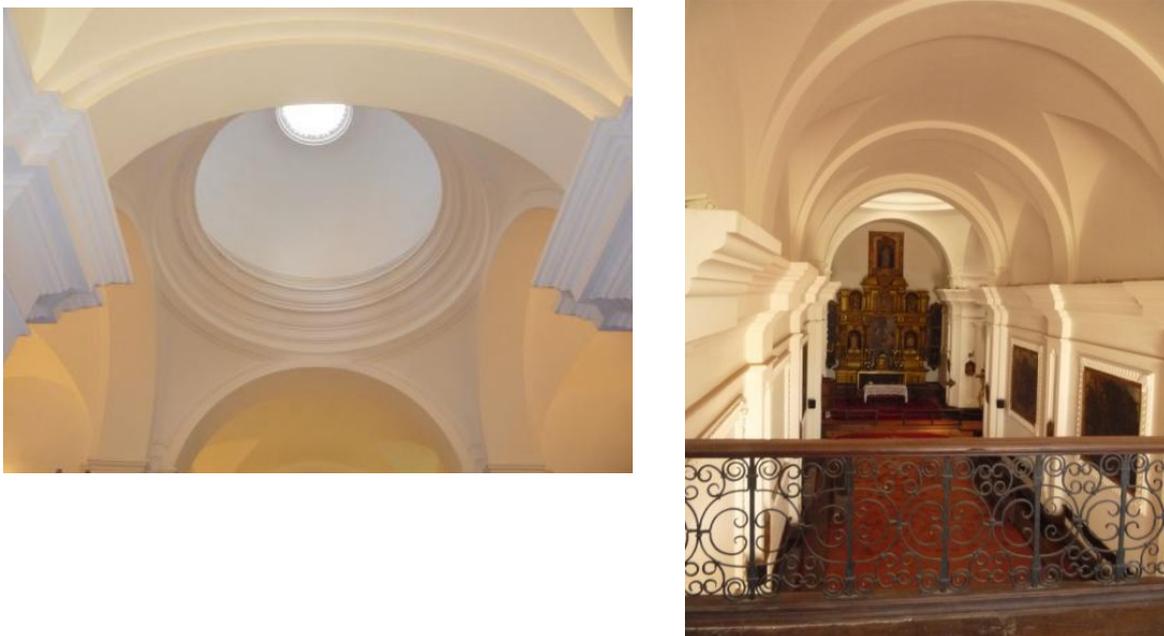


Figura 6. Cúpula e interior de la Iglesia

No obstante, y para tener una certeza del grado de seguridad de la cúpula, se realizó un modelo computacional de la misma, para lo cual se realizó un modelo computacional del sector del crucero en base a las mediciones realizadas desde el interior de la nave y desde el exterior mediante la estación total, con lo cual fue posible deducir tanto el espesor de la cúpula como el del tambor que constituye su basamento y de la linterna que la corona.

Debe mencionarse la absoluta imposibilidad de realizar exploraciones invasivas a la construcción, por su condición de valor patrimonial, por lo que los espesores reales de las diversas partes de la estructura podrían tener alguna ligera diferencia con los espesores estimados a partir de las mediciones realizadas. (Figura 7).



Figura7. Mediciones de la cúpula

El modelo del sector de la cúpula, obtenido a partir de un sólido realizado en CAD, fue mallado automáticamente y procesado mediante el programa de análisis por elementos finitos Algor V19. Los datos dimensionales de la cúpula se muestran en la siguiente sección del modelo CAD: (Figuras 8 y 9)

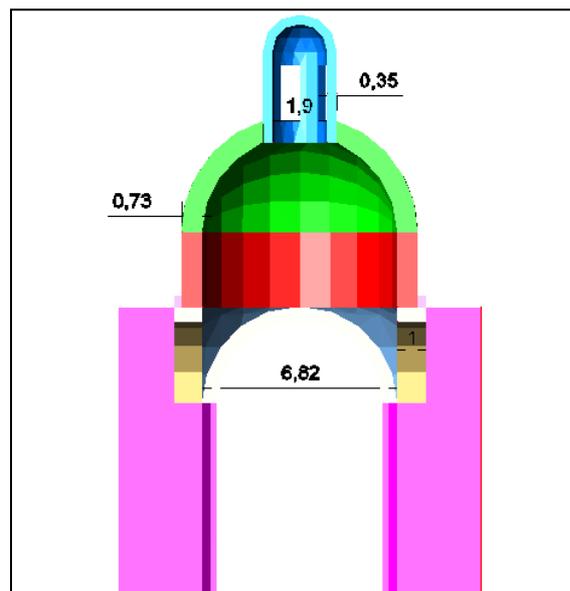


Figura 8. Modelo sólido de CAD - (medidas en metros)

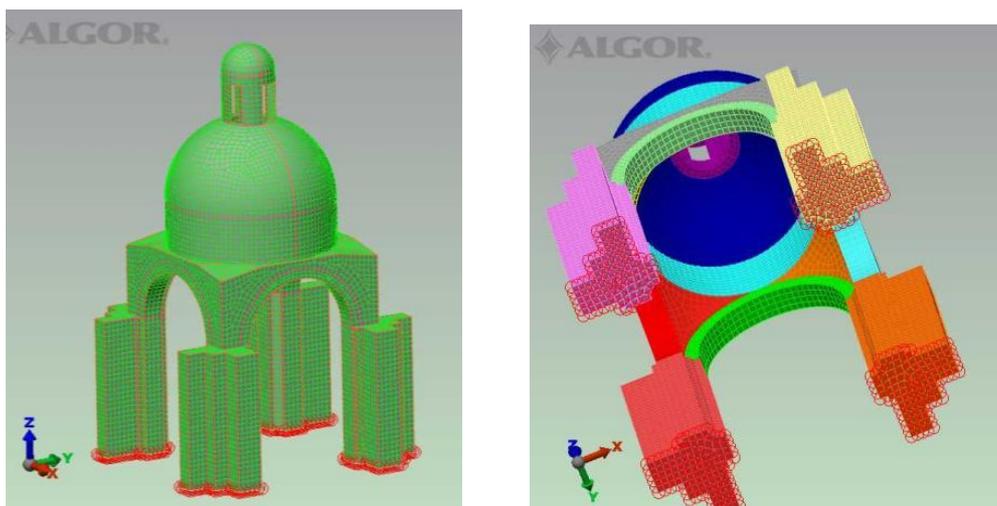


Figura 9. Modelo mallado en Algor

Para considerar la incertidumbre que se tenía con respecto a los verdaderos espesores así como a las cargas impuestas por los ornamentos existentes en la cúpula, linterna y tambor, se decidió procesar el modelo bajo un estado de cargas permanentes incrementadas con un factor 1,05.

El material constructivo de la cúpula, mampostería cerámica, se definió con una densidad de 1800 kg/m^3 y un módulo de elasticidad de $2,7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ (270000 kg/cm^2), al igual que el material del tambor, pechinas, relleno sobre las mismas. Por otra parte, el material de mampostería mixta de piedra y cerámicos de los muros se definió con densidad 2100 kg/m^3 y $E = 1,95 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ (195000 kg/cm^2).

Resultados

La verificación de tensiones y deformaciones de la cúpula dio los siguientes resultados:

Descensos (z): máximo de 2,4 mm (Figura 10)

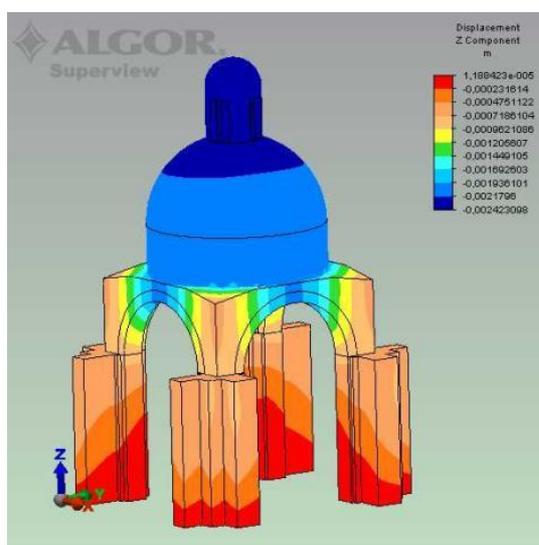


Figura 10. Descensos - Máximo: color azul

Tensiones de Compresión

El mapa de tensiones principales mínimas (tensiones máximas de compresión en cualquier dirección de cada elemento) muestra valores que llegan a 2052113 N/m² (20,5 kg/cm²). Una visualización en detalle permite ver que estas tensiones corresponden a pequeños puntos muy localizados, mientras que en general, los valores de tensiones de compresión que corresponden al tambor y cúpula, tanto en el extradós como en el intradós, no llegan a superar los 11 kg/m² (en el gráfico colores del naranja al celeste). (Figura 11)

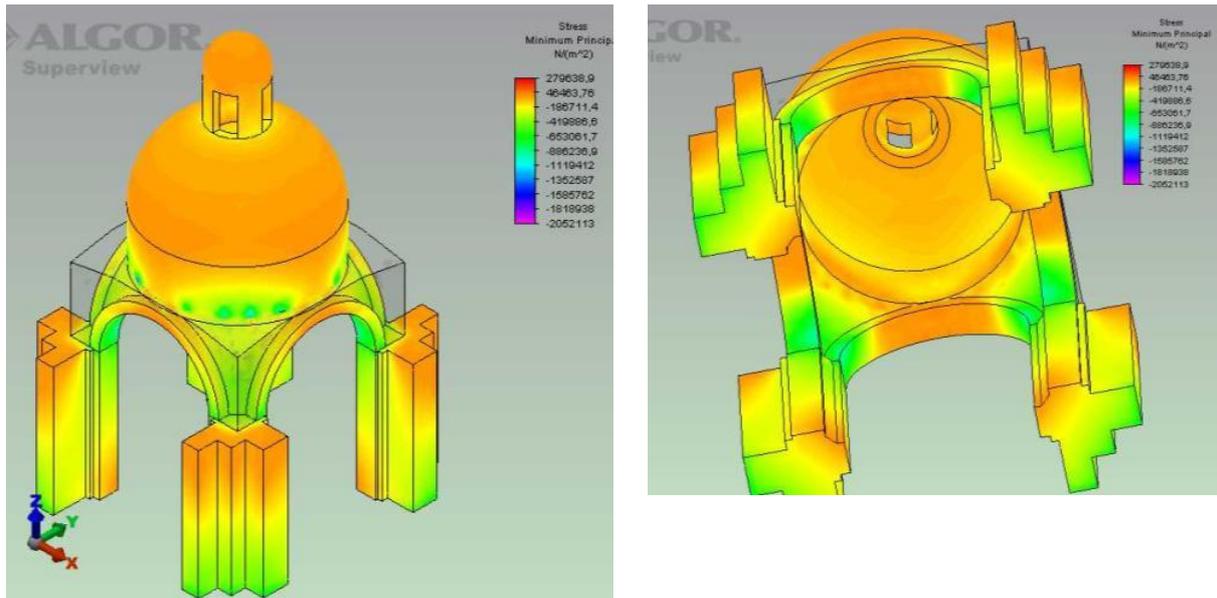


Figura 11. Tensiones Principales de Compresión

Por su parte, en la base de los muros y columnas, al nivel de terreno, las tensiones máximas llegan a los 886236 N/m² (aproximadamente 8,8 kg/cm²) en algunos puntos de los muros de la iglesia, pero puede tomarse como tensión de compresión en la base de muros un valor promedio de 4,2 kg/cm². (colores naranja a beige claro) (Figura 12)

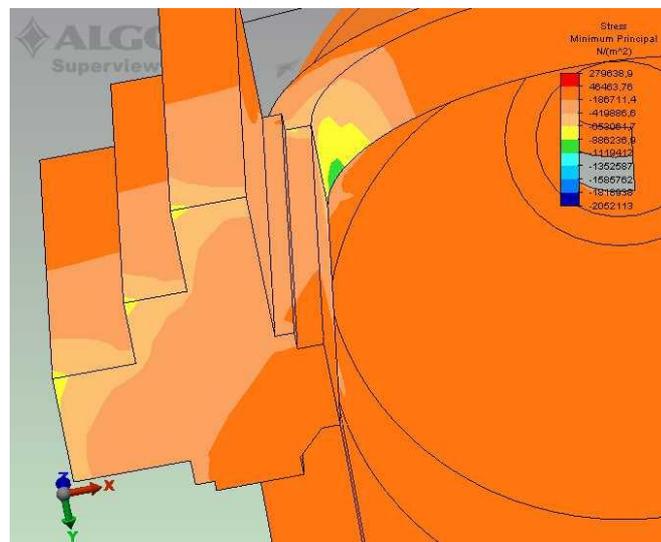


Figura 12. Tensiones de compresión en base de muros.

Tensiones de Tracción

Con relación a las tensiones principales máximas (tensiones de tracción en cualquier dirección de cada elemento) en el sector del tambor, se observan algunos pequeños puntos que alcanzan valores por encima de los 5,7 kg/cm² (amarillo al rojo). En la zona del borde del tambor, se evidencian tracciones de entre 2,5 y 0,9 kg/cm², mientras que en general, en el resto las tensiones de tracción se mantienen por debajo de este último valor. (Figura 13)



Figura 13. Tensiones Principales de Tracción en tambor

El mapa de tensiones de tracción de la cúpula muestra valores que van desde los 0,1 a los 0,48 kg/cm², totalmente aceptables en relación a la capacidad resistente a tracción de la mampostería cerámica que se considera del orden de los 1,8 kg/cm², lo que confirma la no visualización de fisuras durante las inspecciones oculares a la misma. (Figura 14)

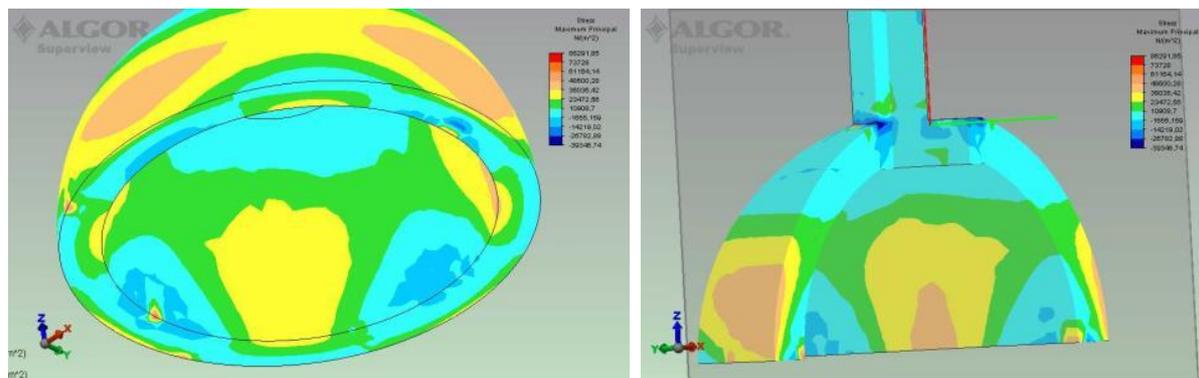


Figura 14. Tensiones de tracción de la cúpula.

VERIFICACIÓN TENSIONAL DE LA BÓVEDA DE RINCÓN DE CLAUSTRO EN HABITACIÓN D9

Durante el relevamiento visual y fotográfico, se evidenciaron fisuras en algunas bóvedas que conforman las cubiertas de las habitaciones que rodean el patio principal. Una de ellas, que además se continúa hacia el muro de sostén de la

bóveda, resultó de particular interés para el estudio, dado que pudo hacerse una calicata exterior al citado muro, con lo cual se pudo estimar la resistencia del suelo de fundación del mismo.(Figura 15)



Figura 15. Habitación D9 y ubicación de la calicata exterior

La habitación, denominada D9 en el plano general, se encuentra ubicada justo en una de las esquinas del patio principal de la Estancia. Esta característica de esquina origina que su cubierta esté conformada por el cruce de las dos bóvedas que llegan de las respectivas alas del patio, formándose lo que se conoce como bóveda de rincón de claustro, sobre las que se asienta la cubierta de tejas a dos aguas. A su vez, esta bóveda está socavada por cuatro lunetas en cada uno de sus lados. (Figura 16)



Figura 16. Interior de la bóveda D9 y fisura de la misma

Las dimensiones y medidas seccionales deducidas de las mediciones realizadas se muestran en el siguiente corte del sector: (Figuras 17)

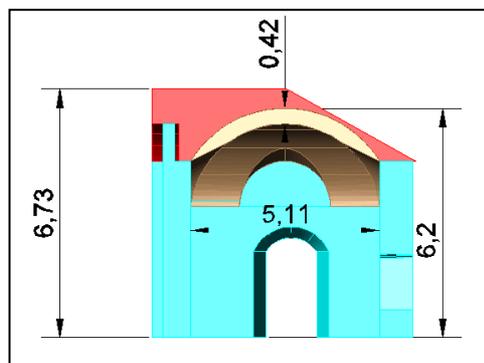


Figura 17. Dimensiones Habitación D9

Al igual que se hizo con la cúpula, se construyó un modelo de sólido en CAD constituido por tres partes: muros, bóveda de rincón de claustro y relleno bajo cubierta de tejas, y se lo procesó con el programa Algor para su mallado y verificación por elementos finitos. (Figura 18)

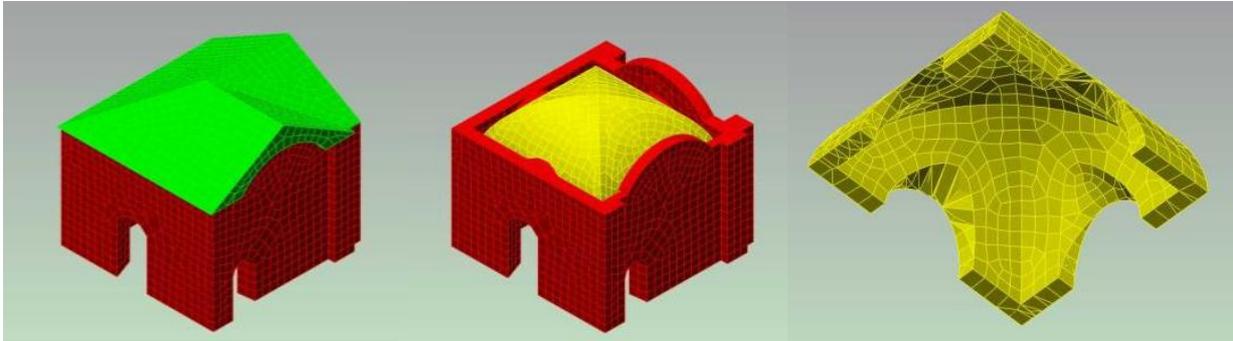


Figura 18. Modelo mallado

La cubierta de tejas se representó como una carga uniforme de 190 kg/m^2 aplicada sobre los faldones a dos aguas determinados por el relleno, el cual es una argamasa de material cementicio con cerámica y piedras. (Figura 19)

Los materiales son similares a los de la Iglesia: muros con peso específico de 2100 kg/m^3 y $E = 1,95 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ (195000 kg/cm^2) y bóveda y relleno con peso específico de 1800 kg/m^3 y $E = 2,7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ ($270\,000 \text{ kg/cm}^2$).

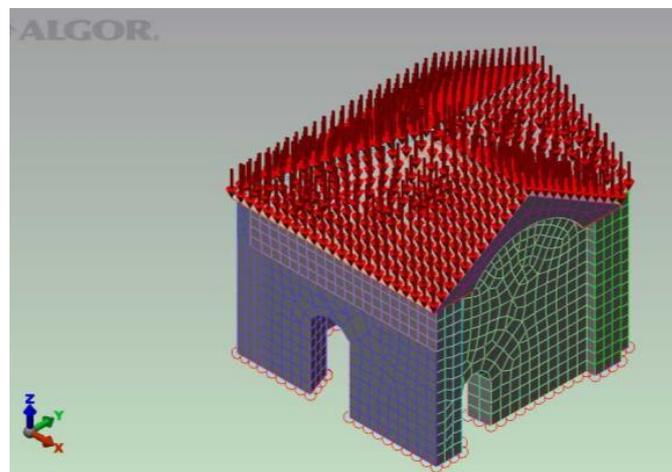


Figura 19. Cargas aplicadas al modelo

Los espesores de la bóveda fueron deducidos a partir de las mediciones desde el interior del local y las mediciones realizadas por el equipo de topógrafos que brindaron datos sobre las alturas de cumbrera y borde de aleros de la cubierta de tejas del sector.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Deformaciones: para las cargas consideradas (permanentes) el descenso máximo resultó de $0,035 \text{ mm}$ en la clave de la bóveda. (Figura 20)

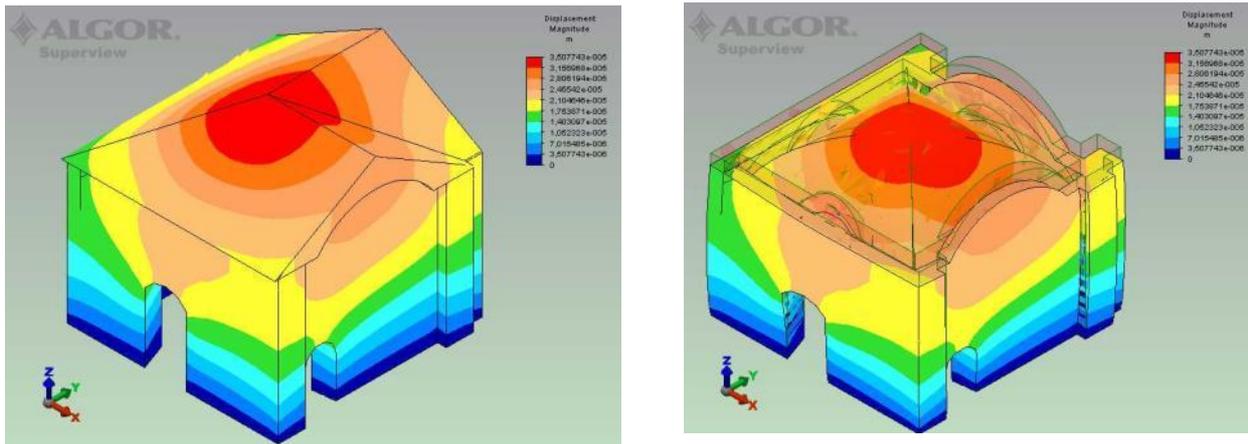


Figura 20. Descensos

El mapa de tensiones de compresión, muestra valores muy por debajo de la capacidad resistente de la mampostería cerámica que tanto en el intradós como en el extradós de la bóveda no llegan a los 2 kg/cm^2 (en el gráfico colores rojo al verde) con algunos puntos muy localizados de tensiones en los bordes de arranque de las lunetas, que llegan a los $2,9 \text{ kg/cm}^2$. (Figura 21)

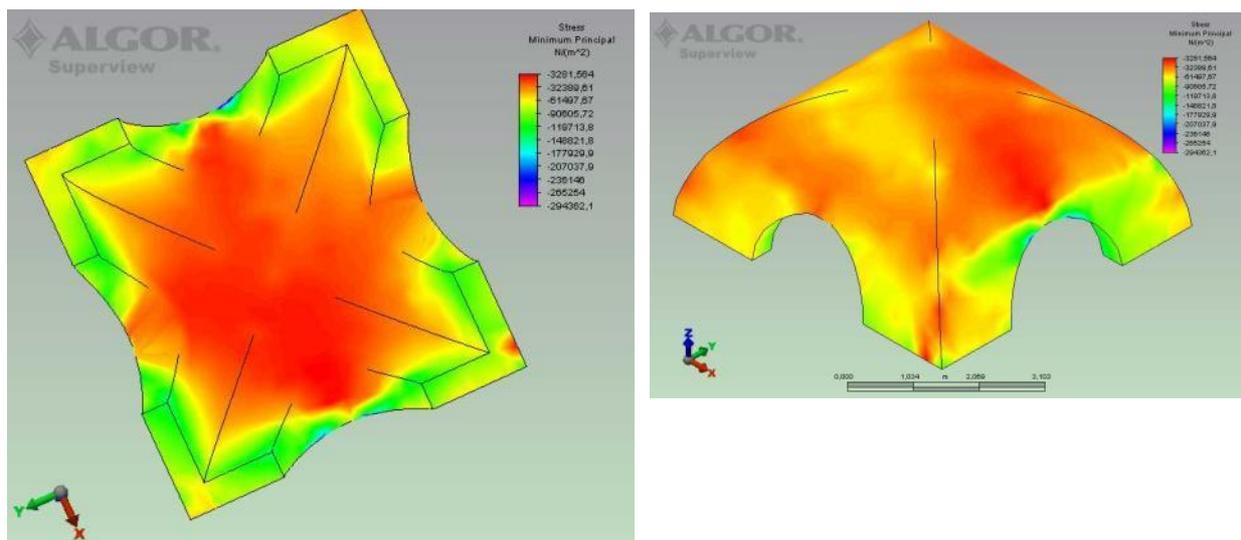


Figura 21. Tensiones de Compresión en la bóveda

En lo que respecta a las tensiones de tracción, de nuestro mayor interés por la posibilidad de origen de fisuras, tampoco resultaron tensiones preocupantes.

La mayor superficie de la bóveda, por ambas caras, no llega a superar los $0,5 \text{ kg/cm}^2$ de tensiones principales de tracción (tonos de azul en el mapa tensional), con algún punto muy pequeño sobre el borde de la luneta que llega a $1,2 \text{ kg/cm}^2$, estando aún por debajo de los $1,8 \text{ kg/cm}^2$ considerados como aceptables. (Figura 22)

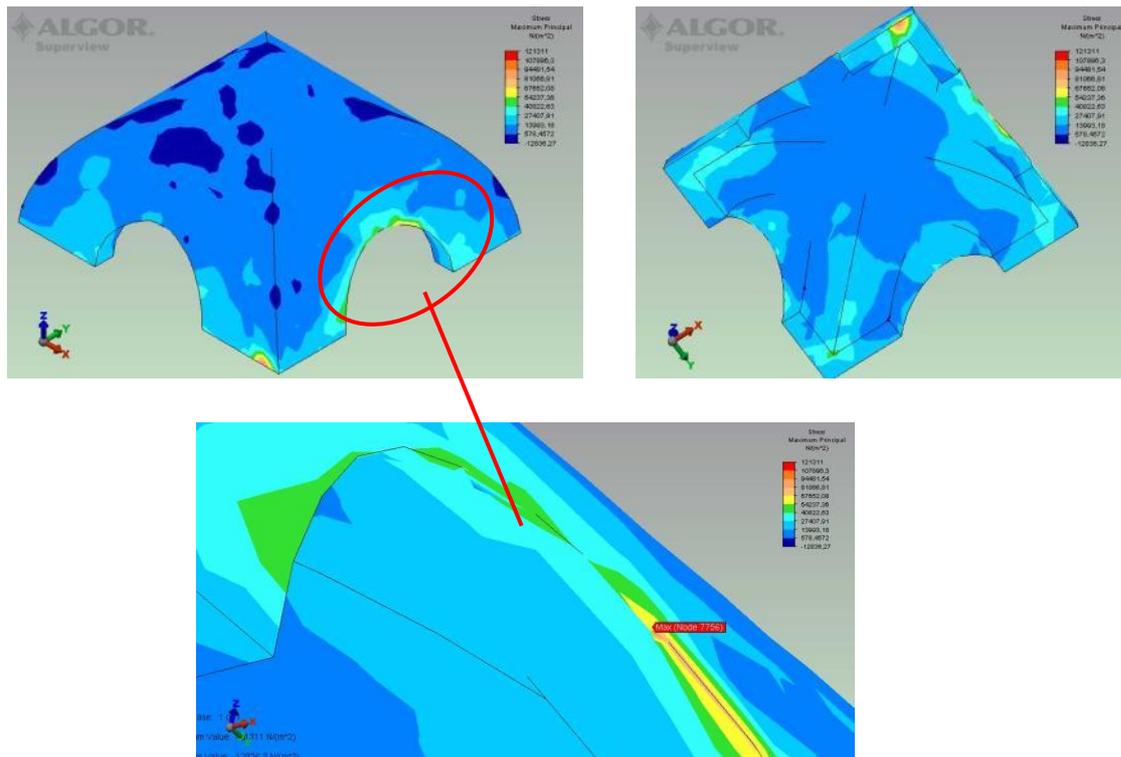


Figura 22. Tensiones de tracción

Descartada entonces, tal como se preveía dada la antigüedad de la obra, la posibilidad de que el origen de la fisura se deba a tensiones de tracción en la bóveda de rincón de claustro por arriba de los valores aceptables, se compararon las tensiones de compresión que llegan a la base de muros, que para las cargas permanentes alcanzan los $2,05 \text{ kg/cm}^2$, con la tensión admisible de terreno obtenida de estudio de suelo realizado en ese sector, que resultó de $0,95 \text{ kg/cm}^2$. Esto significa, considerando un coeficiente de seguridad 3 que la tensión de rotura del suelo es del orden de los $2,85 \text{ kg/cm}^2$, un valor bastante cercano a las tensiones producidas en la base de los muros del sector. (Figura 23)

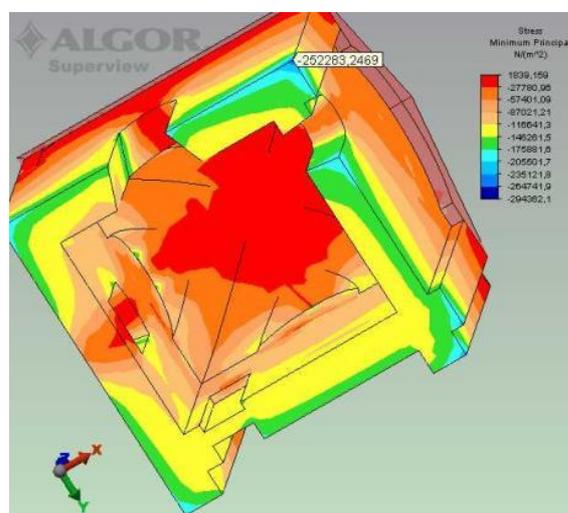


Figura 23. Tensiones de compresión en base de muros D9

Por otro lado, el contenido de humedad del terreno, 19,5 %, medido en la base de la habitación D9, resultó mucho mayor que en otros sondeos, por lo que se considera posible que estas dos condiciones, capacidad resistente y humedad del suelo de fundación, sean la causa de la aparición de la fisura relevada en el muro de la habitación.

Puede decirse que los valores de tensiones en la base de los muros en los casos analizados: cúpula de la Iglesia, habitación D9 y bóveda del sector coro de la Iglesia (no presentado en este trabajo), resultan cercanos a los valores de rotura del terreno de fundación dado por los estudios geotécnicos. Esto nos permite generalizar el poco margen de seguridad que tiene el edificio respecto al comportamiento del sistema suelo-estructura, y como consecuencia la aparición de fisuras visualizadas en algunos muros de otras habitaciones.

Por lo tanto se aconseja realizar un seguimiento con el fin de tratar de evitar, en lo posible, cambios en las características físicas del terreno de fundación, ya que estos pueden producir asentamientos diferenciales y como consecuencia fisuras en muros y/o en la estructura superior.

Por otra parte es de esperar que frente a la acción de cargas variables, como los sismos, se produzcan sollicitaciones mayores en las fundaciones que puedan superar las tensiones de rotura del suelo, donde las cargas permanentes ya producen tensiones cercanas a la misma.

VERIFICACIÓN TENSIONAL DEL SECTOR DEL NOVICIADO

El edificio del Noviciado, ubicado a unos 150 metros al noreste de la Iglesia, es uno de los pocos sectores donde puede apreciarse la técnica constructiva de las bóvedas de mampostería. Sus muros, al igual que en el edificio principal, son de mampostería mixta de piedra y cerámica. (Figura 24).



Figura 24. Vistas del Noviciado

Así mismo, en esta construcción es posible visualizar el material constitutivo del relleno entre faldones de cubierta y bóvedas, por lo que se puede suponer que es el mismo utilizado en las otras bóvedas analizadas, y entonces estimar su peso propio para el análisis de cargas. (Figura 25)

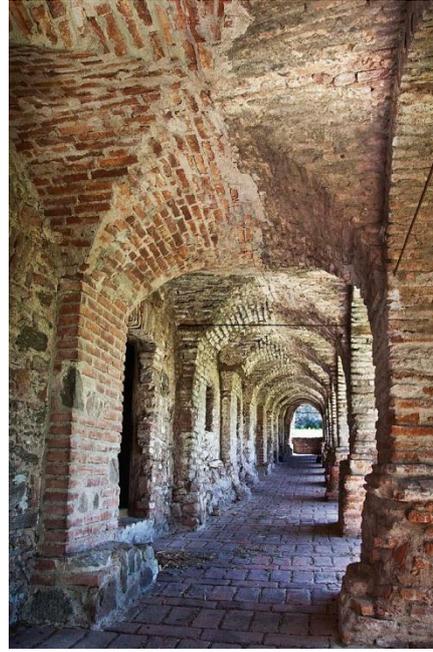


Figura 25. Galería del Noviciado

Para tener una certeza del grado de seguridad de la bóveda de cañón corrido que conforma el techo de las habitaciones del Noviciado y las bóvedas de aristas de la galería, se realizó un modelo computacional de un sector, en base a las mediciones realizadas tanto desde el interior de la nave como desde el exterior, con lo cual fue posible deducir los espesores de los distintos elementos constitutivos.

El modelo del sector del noviciado, se realizó de manera similar a los otros dos modelos anteriores. Los datos dimensionales del sector elegido para el estudio se muestran en la siguiente sección del modelo CAD. (Figura 25):

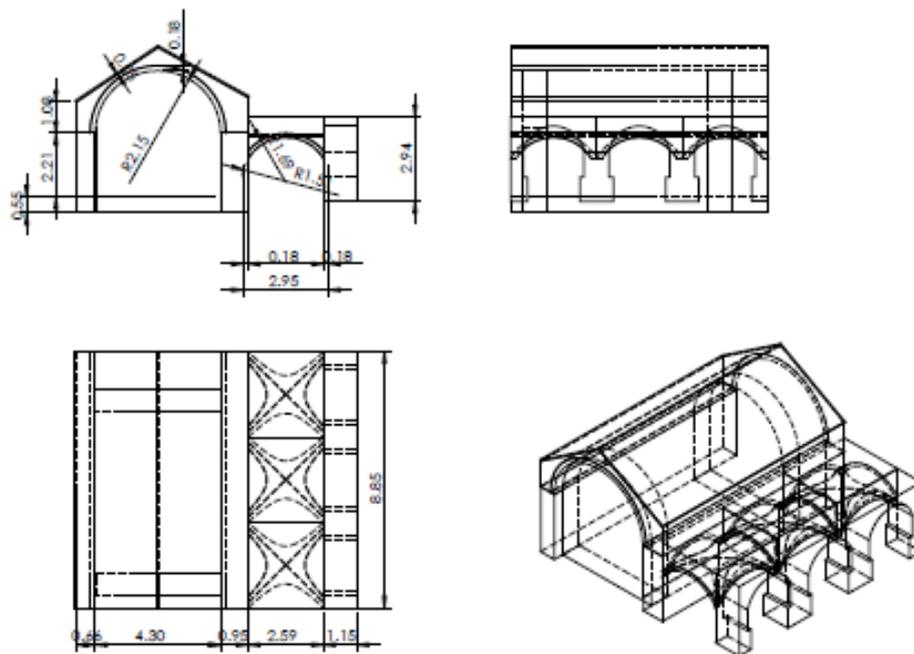


Figura 25.

Manteniendo los mismos criterios que para los modelos anteriores, se decide procesar el modelo bajo un estado de cargas permanentes incrementadas con un factor 1,05.

El material constructivo, de mampostería mixta de piedra y cerámicos de los muros se definió con densidad 2100 kg/m³ y un módulo de elasticidad $E = 1,95e10$ N/m² (195000 kg/cm²).

El modelo mallado, con y sin la cubierta a dos aguas, se muestra en la Figura 26:

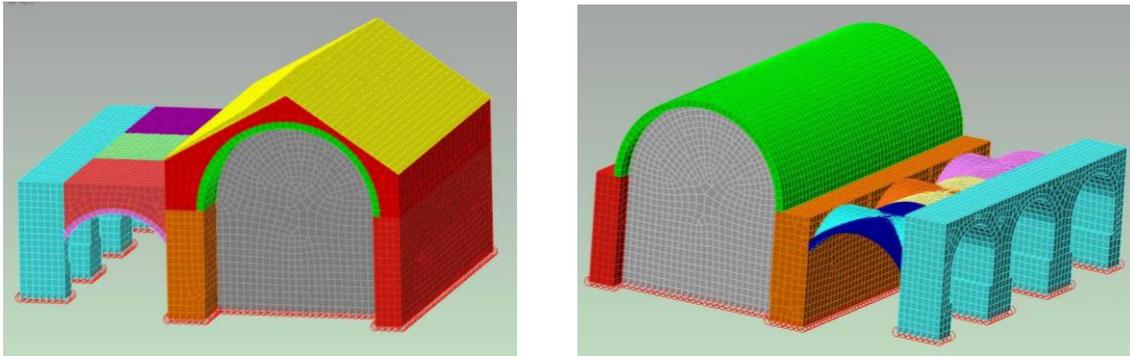


Figura 26. Modelo mallado con y sin cubierta.

Resultados

La verificación de tensiones y deformaciones dio los siguientes resultados:

Descensos (z): 1,6 mm en bóveda de la habitación, color rojo en el gráfico, y 0,9 mm en bóvedas de la galería, color verde. (Figura 27).

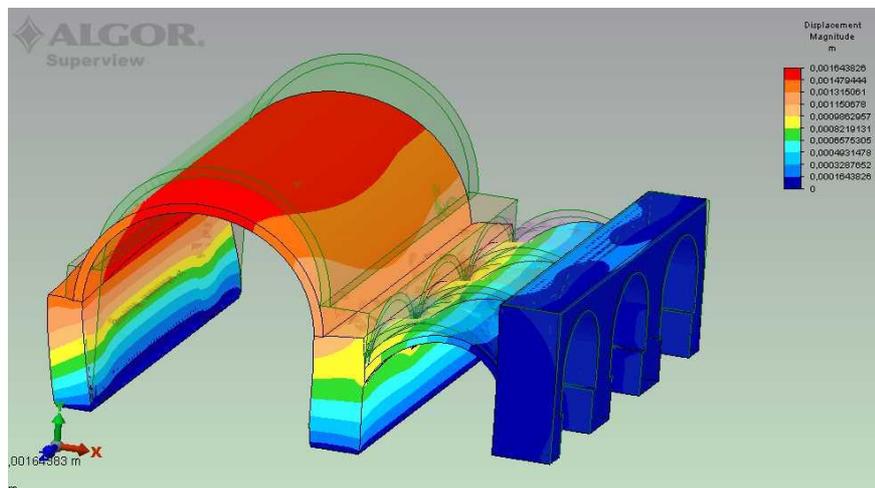


Figura 27. Descensos Sector del Noviciado.

Tensiones de Compresión

El mapa de tensiones principales de compresión muestra un valor máximo de 2271792 N/m² (22,7 kg/cm²) en el encuentro entre las bóvedas de galería con las columnas (azul)

En la clave de las bóvedas de la galería, las tensiones están por debajo de los 368726 N/m² (beige claro) igual que en la clave de la bóveda de cañón. (Figura 28).

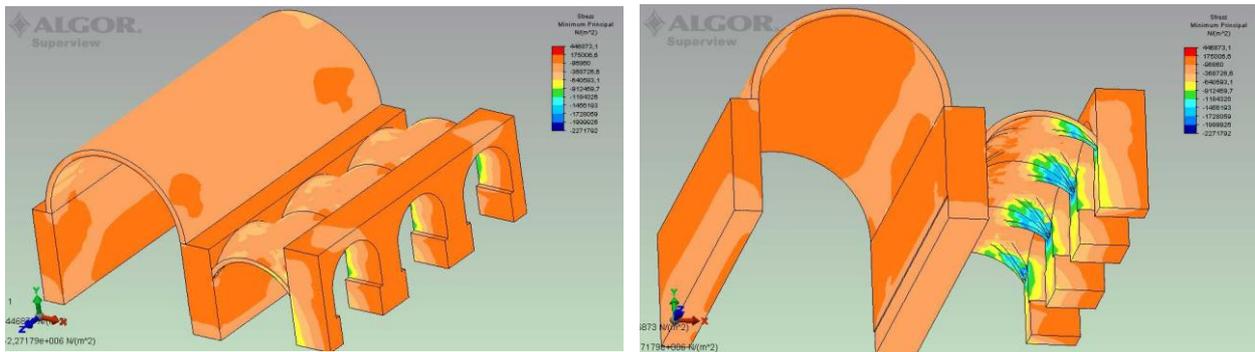


Figura 28. Tensiones de Compresión

Por su parte, , al nivel de terreno, las tensiones máximas de compresión, resultaron: en la base de los muros con valores que varían en el ancho de los mismos, entre 368726 N/m² a 96800 N/m², dando un promedio de 232763 N/m² (2,3 kg/cm²); en la base de las columnas, la variación en el ancho es de 912000 a 96800 N/m², lo que da un promedio de 504400 N/m² (5 kg/cm²) (colores naranja a beige claro del gráfico). (Figura 29)

Estos valores no resultan en absoluto preocupantes, dado que este edificio, ubicado a considerable distancia del resto de la Estancia, está fundado sobre roca madre, terreno cuyas tensiones de rotura son muy altas.

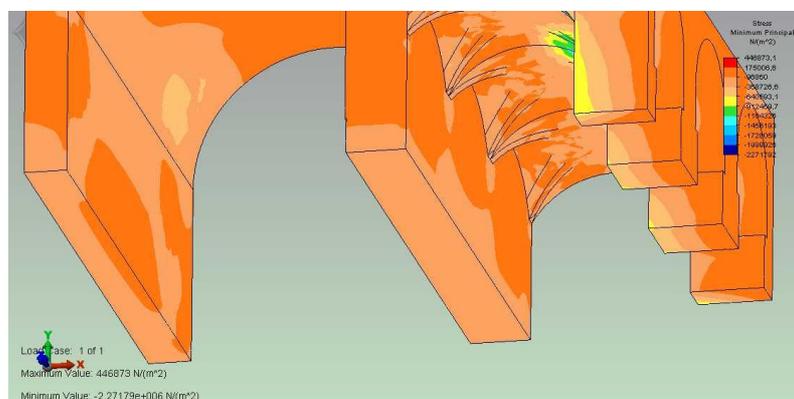


Figura 29. Tensiones en base de muros

Tensiones de Tracción

Con relación a las tensiones principales de tracción, el modelo muestra puntos de concentración de tensiones elevadas (para los valores aceptables en mampostería cerámica), ubicados en la zona de contacto entre bóvedas de aristas de la galería y columnas, con valores que en algún punto muy pequeño llegan a los 17,8 kg/cm² (color rojo) y decrecen rápidamente en las cercanías del mismo hasta valores del orden de los 7 kg/cm² (color verde).

El resto de la bóveda está trabajando con tensiones de tracción de entre 2,2 y 0,8 kg/cm². (colores celeste - azul). (Figura 30)

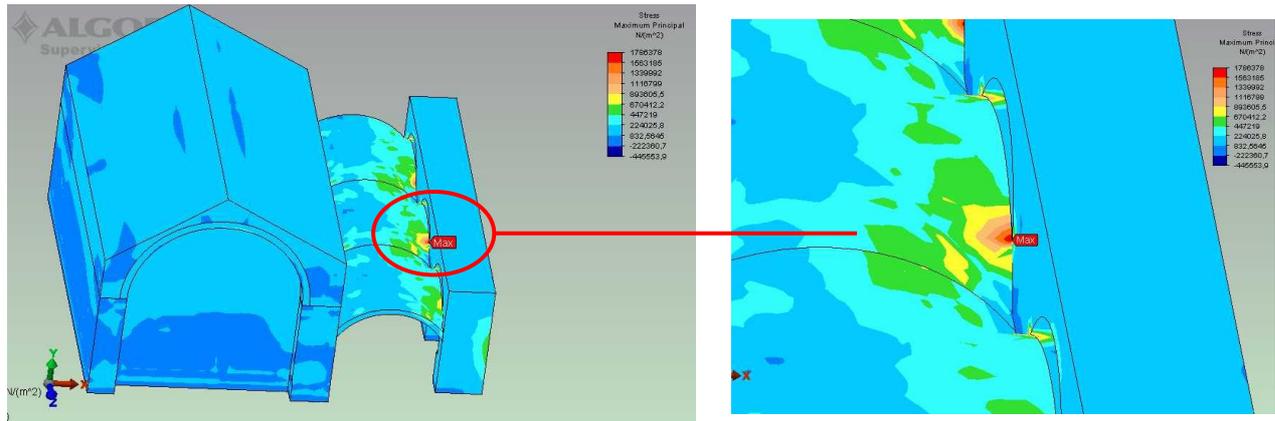


Figura 30. Tensiones principales de tracción.

Por su parte, la bóveda de cañón corrido de las habitaciones tiene tensiones de tracción en su clave con valores entre los 2 y 3 kg/cm². (Figura 31)

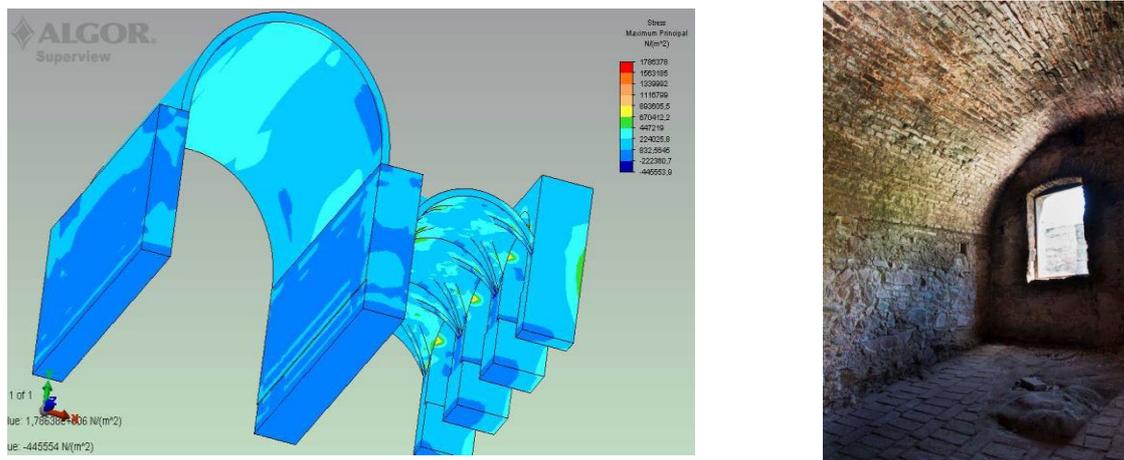


Figura 31. Tensiones de Tracción en bóveda y vista de la misma.

CONCLUSIONES

Los modelos realizados de diversos sectores de la Estancia Santa Catalina, permitieron corroborar las presunciones sobre el aceptable grado de seguridad de las bóvedas y cúpula, demostrado por la escasa visualización de manifestaciones patológicas en las mismas, en cuanto a su conformación estructural.

La comparación entre las tensiones que llegan al nivel de fundación originadas por la carga permanente, con la tensión de rotura del terreno obtenida mediante el estudio geotécnico, demostró el escaso margen de seguridad del edificio en relación al comportamiento del sistema suelo - estructura, permitiendo suponer que las fisuras detectadas, principalmente en los muros, han sido originadas por asentamientos diferenciados de la fundación.

Esta situación hace necesario recomendar se tomen previsiones a fin de evitar la variación en las características físicas del terreno de fundación, así como también evitar el incremento de las cargas aplicadas a la estructura.

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento especial al Consejo de Administración de la Estancia Jesuítica Santa Catalina, en la persona de su administrador, Arq. Daniel M. de la Torre.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gerónimo Lozano Apolo y Alfonso Lozano Martínez-Luenga: *Curso Técnicas de Intervención en el Patrimonio Arquitectónico*.
- [2] Philibert de L'Orme: *Architecture - Edición Integrale - año 1648*.
- [4] Algor Inc. : *Guía del Usuario Algor*.