

# EL CONCEPTO DE PRETENSADO APLICADO AL EQUILIBRIO DE UN ROSETÓN GÓTICO. RESTAURACIÓN DEL ROSETÓN DE LA SEO DE MANRESA

Dr. Brufau Niubó, R<sup>1\*</sup>, Dr. Martín Sáiz, D<sup>2</sup>

(1) Ph.D. Architect, Professor at the Polytechnic University of Catalonia, Department of Structural Architecture, ETSAV, Sant Cugat del Vallès Barcelona.

Founding member of BOMA, Barcelona.

(2) Ph.D. Architect Managing Partner of BOMA Norte, Getxo, Vizcaya.

## RESUMEN:

Dentro del comportamiento resistente de un rosetón gótico está implícito uno de los conceptos modernos que se aplica en las tipologías estructurales actuales: el pretensado o postensado para compensar las tracciones debidas a la flexión. En los manuales de construcción medievales, como el de Villard de Honnecourt, no se hacía referencia más que a cuestiones formales y geométricas. Sin embargo, este concepto era aplicado intuitivamente por los constructores de catedrales como mecanismo fundamental de estabilidad de la lámina del rosetón frente a las acciones de viento. Durante la restauración del rosetón de la Seo de Manresa, realizado por los autores, se ha puesto en práctica este método de análisis dándole un sentido científico a esa intuición a través de la Teoría de Resistencia de Materiales, desarrollada cinco siglos después de su construcción. Es por lo tanto uno de los muchos hitos estructurales que a pesar de tener gran importancia en la historia de la arquitectura, pasaron desapercibidos en su momento.

**Palabras clave:** Rosetón, Seo de Manresa, Pretensado, Restauración, Arquitectura gótica.

## THE CONCEPT OF PRESTRESSED APPLIED TO THE BALANCE OF A GOTHIC ROSE WINDOW. ROSE WINDOW RESTORATION OF THE MANRESA CATHEDRAL.

## ABSTRACT:

Into the resistant behavior of a Gothic rose window there is implicit one of the modern concepts applied in the current structural types: the pre or post-tensioned to compensate tensions due to bending moments. In the medieval construction manuals, such as Villard de Honnecourt, these refer only to formal and geometric issues. However, this concept was applied intuitively by the builders of cathedrals as a fundamental stability mechanism of the plate of the rose window under of the wind load.

During the restoration of the rose window at the Cathedral of Manresa, directed by the authors, this method was implemented giving to the analysis a scientific meaning through the Theory of Strength of Materials which was developed five centuries after its construction. This is one of the many structural events that went unnoticed despite of having great importance in the history of architecture.

**Keywords:** Rose Window, Manresa Cathedral, Prestressed, Restoration, Gothic Architecture.

\* robert.brufau@boma.es

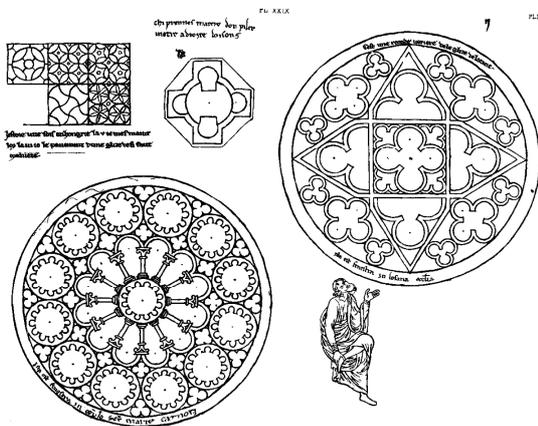
## 1. Introducción

Un rosetón está formado por una gran superficie circular configurada a partir de nervios de piedra tallada y sometida al empuje de viento, aplicado perpendicularmente al plano que los contiene. El espacio entre nervaduras se cubre mediante vidrieras de colores, generalmente haciendo alusión

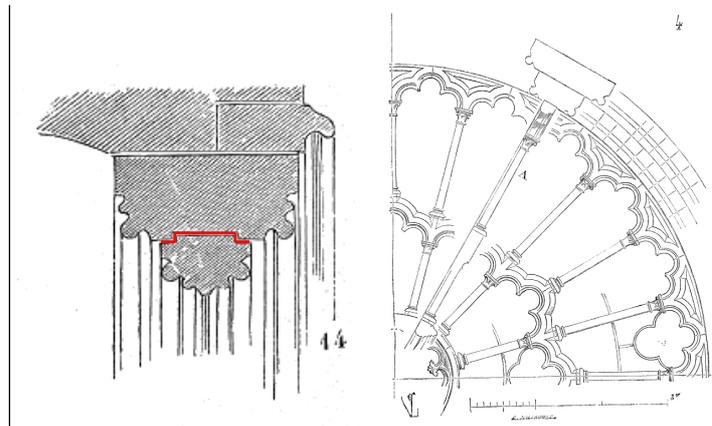
a la simbología religiosa<sup>1</sup>. Al margen de la entrada de luz que esto supone en las catedrales construidas principalmente durante el período gótico, generalmente tienen también un cierto significado místico, como por ejemplo en el caso de la catedral de Palma, donde la proyección del rosetón oriental sobre el interior de la fachada occidental produce un efecto mágico de luces.

Apenas existe historiografía sobre la construcción de este tipo de elementos. Entre 1230 y 1240 Villar de Honnecourt escribió su álbum de arquitectura<sup>2</sup> donde se especificaban criterios geométricos y constructivos. Esta publicación recogía todo tipo de pautas para la construcción de catedrales, desde intersecciones entre bóvedas, estereometría de la piedra o el significado de las formas geométricas, hasta diseños de artilugios o máquinas que sirviesen como ayudas a la construcción. Sin embargo, el diseño de rosetones únicamente se cita puntualmente en el cuaderno<sup>3</sup> y sólo se hace referencia a su simbología. No aparecen indicaciones sobre su construcción y comportamiento mecánico.

Posteriormente, en 1866, Viollet-le-Duc recogió en una recopilación sobre arquitectura francesa de los siglos XI y XVI diferentes aspectos técnicos referentes a la construcción de este tipo de elementos arquitectónicos,<sup>4</sup> como por ejemplo el encaje de la tracería del rosetón dentro del perímetro circular del hueco en el muro, mediante lo que hoy en día denominaríamos una llave a cortante. Desde un punto de vista mecánico moderno, uno de los pocos autores que ha abordado el problema ha sido Jacques Heyman<sup>5</sup>, apuntando hacia una analogía del comportamiento del rosetón con el de un arco plano, necesariamente precomprimido para conseguir su estabilidad.



Láminas del Álbum de Villard de Honnecourt donde se hace referencia al trazado de rosetones.



Esquemas de Viollet-le-Duc a propósito de la trabazón entre diferentes piezas que forman la tracería de un rosetón.

El mecanismo de estabilidad de un rosetón implica conceptos estructurales actuales de un cierto grado de complejidad. La carga de viento, uniformemente repartida y perpendicular al plano del rosetón, genera esfuerzos de flexión sobre la lámina formada por la tracería. El valor máximo se produce en el centro de la circunferencia y debe que ser asumido por un sistema de piezas de piedra unidas entre sí tan solo con juntas de mortero de cal y, en el mejor (o peor) de los casos, con alguna grapa de hierro abrazando la tracería. La sección de estas piezas en muchas ocasiones suele estar entre los 15 cm y 30 cm de espesor y, por supuesto, no existe ningún elemento continuo de unión que asuma las tracciones, como podría ser una armadura. Lo que ha motivado la realización de este estudio es que, al contrario de lo que cabría esperar de este razonamiento, existen numerosos ejemplos construidos que han perdurado hasta la actualidad,

<sup>1</sup> Según Viollet-le-Duc, la definición de rosetón es "el nombre que damos a las ventanas circulares que se abren en las paredes de las iglesias de la Edad Media"

<sup>2</sup> Le carnet de Villard de Honnecourt.

<sup>3</sup> HONNECOURT, Villard. *Le carnet de Villard de Honnecourt*. Láminas 29 y 30

<sup>4</sup> VIOLLET-LE-DUC, E. *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*. Tomo I (definición de "Appareil"), págs.. 32-33 y Tomo 8 (definición de "Rose"), págs. 38-68. Ed. Morell. Paris 1866

<sup>5</sup> HEYMAN, J. *Rose Windows*. Capítulo dedicado a este tipo de estructuras dentro del libro *Essays on the History of Mechanics*, págs. 165-177

contradiendo la reflexión anterior<sup>6</sup>. Esto es debido a que en su comportamiento estructural hay implícitos una serie de conceptos no tan evidentes y que hoy en día pueden ser analizados desde el conocimiento científico actual. Esta situación tensional, aunque no cuantificada por los constructores de catedrales, seguro que era bien intuitiva. Habitualmente, según se iba completando la tracería, se retacaban unas piezas con otras. El efecto producido es el de una precompresión inicial en el conjunto que, aunque no se cuantificase, se suponía suficiente para afrontar el empuje del viento. El re-acuñamiento entre piezas, observado en varios ejemplos, se ha ido produciendo a lo largo de la historia del edificio, inicialmente con cuñas de madera y posteriormente con cuñas de hierro y de acero, con el objetivo de mantener siempre una compresión interna entre piezas que garantice su estabilidad.

Desde un punto de vista mecánico moderno, el comportamiento tensional de una sección de la tracería se asemeja a un elemento pretensado, donde la compresión inicial logra compensar las tracciones debidas a la flexión cuando éste entra en carga. El hecho de aplicar la compresión mediante el acortamiento elástico, debido al acuñamiento, sin ningún tipo de control cuantitativo, no afectaba a la seguridad del conjunto ya que, en estructuras de fábrica, el colapso no suele producirse por exceso de compresión, sino por la formación de diferentes rótulas debidas a la incapacidad de la fábrica de asumir tracciones, así hasta llegar al mecanismo. En otras palabras, mientras se garantizase la ausencia de tracciones en todas las secciones, se podía asegurar la estabilidad del rosetón. Es de suponer que en algunas ocasiones el acuñamiento no habrá sido suficiente para comprimir de manera eficaz la tracería y más de un rosetón habrá colapsado a lo largo de la historia.

El caso del rosetón de la Seo de Manresa no es de los de mayor diámetro que se hayan construido. El gótico francés cuenta con ejemplos de gran envergadura. El rosetón de la catedral de Estrasburgo, de Ø15,0m o Notre Dame de París de Ø12,9m son muestras de ello. En España también hay buenos ejemplos como el rosetón de la catedral de Palma, de Ø13,8m y los de las catedrales de Toledo, Burgos o León. Más cercanos a la Seo de Manresa, son buenas muestras los rosetones de la catedral de Barcelona, Santa María del Mar o Santa María del Pi y ya con menor dimensión, los de los monasterios de Sant Cugat y Santes Creus, de Ø8,2m y Ø6,35m respectivamente.

## **2. Rosetón de la Seo de Manresa**

Durante el año 2005, dentro del Plan Director de Restauración de la Seo de Manresa, se abordaron los trabajos de intervención del gran rosetón de estilo gótico de la fachada principal. El Plan Director fue redactado por el arquitecto Francisco Javier Asarta junto al cual, los autores, pudimos abordar diferentes partes de la restauración del conjunto monumental.

Como se ha puesto de manifiesto, este rosetón no es uno de los ejemplos de mayor importancia dentro de su tipología, ya que tiene un diámetro de 6,2m. Esta dimensión difiere mucho de los 15,0m de la Catedral de Estrasburgo o los 12,8m de la Catedral de Palma. Sin embargo, su diámetro resulta suficiente como para manifestar un problema evidente en cuanto a la estabilidad. Esto es, la flexión que debe soportar la tracería debido a las acciones horizontales del viento.

La construcción de la Seo es del siglo XIV y fue llevada a cabo por Berenguer de Montagut. El rosetón fue construido durante la última época del periodo gótico, coincidiendo con la culminación de la construcción de la fachada principal del monumento, a finales del siglo XV, por el maestro de obras Martí d'Ibar. Como sucede en muchos edificios históricos, el monumento ha sufrido a lo largo de la historia numerosos cambios, afectando también al rosetón principal. A finales del siglo XIX, éste fue reconstruido ya que su tracería y vidrieras quedaron seriamente dañadas durante un incendio. Posteriormente esta tracería resultó también afectada debido a la voladura del *Pont Vell*, situado al pie de la Seo, durante la Guerra Civil. Como medida preventiva para evitar su derrumbamiento a causa del empuje del viento se colocó, no se conoce con exactitud el momento, una estructura metálica por la cara exterior a modo de apuntalamiento provisional, que se ha conservado hasta el momento de la restauración. Al abordar la intervención global del monumento

---

<sup>6</sup> Es un claro caso de incompatibilidad entre esfuerzo y material, en esta ocasión la piedra, ya que ésta es incapaz de transmitir tensiones de tracción.

se ha considerado la posibilidad de restituir la imagen exterior original del rosetón, eliminando toda la estructura auxiliar colocada para evitar el desplome de la tracería.

En una visión cercana, se pudo observar que los problemas estructurales del rosetón resultaban ser fundamentalmente la oxidación de las cuñas o grapas de hierro colocadas para su montaje y un patente desajuste entre las diferentes piezas que formaban la tracería. Al margen de estos problemas, el contacto de la piedra con los elementos metálicos de apuntalamiento resultó ser también un problema debido a la oxidación. De este modo, el objetivo de la intervención ha sido el de, al mismo tiempo que se restituya la visión primitiva del rosetón, también se recupere su comportamiento estructural original, de manera que no requiera de ninguna estructura auxiliar para ser estable frente al viento. No hay mejor manera de restaurar que la de devolver su función y consolidar el papel estructural de los diferentes elementos de un monumento.

Este caso concreto ha permitido a los autores plantearse, desde un punto de vista mecánico-moderno, cuál es el funcionamiento de estos singulares elementos arquitectónicos, cuya evolución histórica evidencia su correcto funcionamiento frente a las acciones que lo solicitan.



*Visión general del rosetón antes de la restauración.*



*Detalle de la estructura metálica de soporte provisional*

### 3. Modelización

Para el análisis se han utilizado dos modelos mediante elementos finitos en régimen elástico lineal. En el primero, de inercias equivalentes, se analizan los efectos de viento sobre la tracería solicitada únicamente por esta acción y el peso propio. Posteriormente, se valora el estado tensional de las secciones más desfavorables, cuantificando cual debe ser el esfuerzo axial de compresión necesario para compensar las tracciones derivadas de la flexión. En un segundo modelo, de áreas equivalentes, se aplica el esfuerzo de compresión necesario que compense las tracciones. Esto se realiza mediante la introducción de una carga térmica virtual, verificando posteriormente que las tracciones de la cara interior quedan todas comprimidas.

#### ▪ **Parámetros de partida:**

##### Datos del material:

Existe numerosa bibliografía referente a las características de las fábricas de piedra análogas a la existente<sup>7</sup>:

Módulo de elasticidad: 150.000 Kg/cm<sup>2</sup>

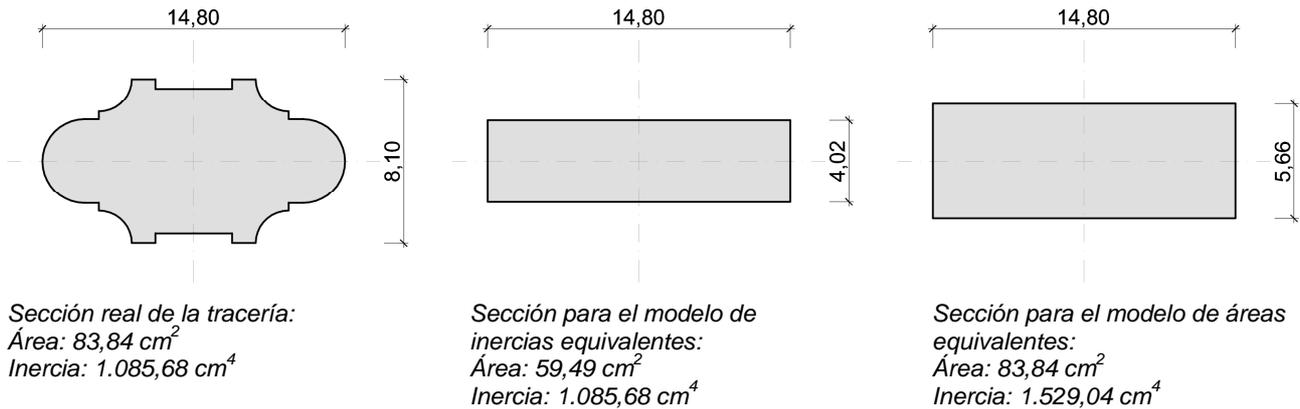
Densidad: 2.000 Kg/m<sup>3</sup>

Tensión máxima admisible: 40 Kg/cm<sup>2</sup>

---

<sup>7</sup> P.I.E.T. 70 Estructuras de fábrica

### Sección considerada:



### Condiciones de contorno:

La conexión de la tracería del rosetón con el muro de fachada en el que queda embebido debe considerarse como una articulación, con libertad para el giro perpendicular al plano de la superficie, pero inmovilizando los desplazamientos verticales y horizontales. Sin embargo, en el modelo se ha articulado todo el perímetro diferenciando la mitad superior de la circunferencia de la parte inferior. Esto es debido a que el bloqueo del desplazamiento vertical en todo el contorno provocaría que el rosetón quedase virtualmente “colgado” de la semicircunferencia superior. De este modo, en la parte inferior se han impedido tanto los desplazamientos verticales - peso propio de la tracería - como los horizontales - viento - , mientras que en la parte superior sólo se ha impedido el desplazamiento horizontal - viento - .

### Hipótesis de cálculo:

Se han considerado las siguientes hipótesis simples de carga:

Peso propio de la piedra: Según la densidad del material

Peso propio del vidrio:  $20 \text{ Kg/m}^2$

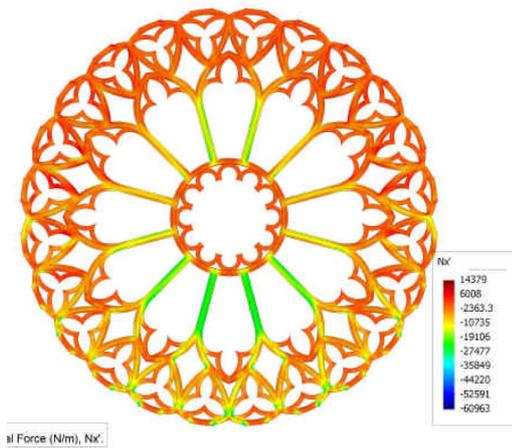
Viento:  $W=80 \text{ Kg/m}^2$  actuando perpendicularmente a la superficie del rosetón.

Como hipótesis combinada, para la evaluación del Estado Límite Último, se ha considerado la concomitancia de la carga de viento máxima con el peso propio de la tracería. En este último caso, al ser una acción favorable, se ha adoptado un coeficiente de aplicación de 0,9.

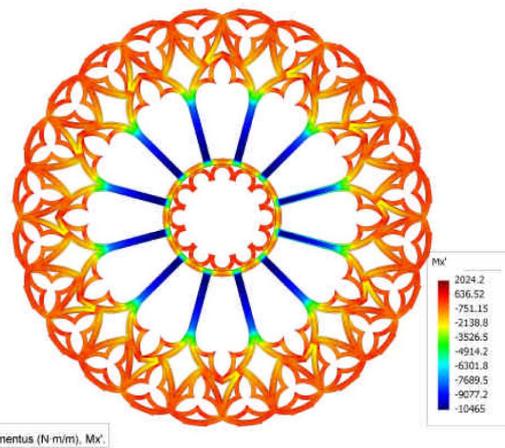
### ▪ **Análisis:**

Del primer modelo de inercias equivalentes se deduce que sin ninguna compresión previa en el sistema, las tracciones producidas en la cara interna del rosetón no quedan compensadas por el peso propio. Es evidente que tanto la piedra que forma la tracería como las juntas entre piezas, son incapaces de asumir los valores de tracción (ya que no se dispone de armadura). De esta manera, se produce una línea de articulación coincidente con la unión entre el círculo interior y los doce radios. Esto conlleva a un mecanismo de colapso al coexistir cuatro articulaciones, quedando necesariamente el sistema en desequilibrio.

En el diagrama de esfuerzos axiales debidos al peso propio se puede observar que los cuatro radios más horizontales son los menos cargados y, por lo tanto, los más sensibles a que se produzca el mecanismo de inestabilidad.



axiles Force (N/m), Nx'



mentos (N m/m), Mx'

Diagrama de axiles debidos al peso propio.

Diagrama de momentos debidos al viento

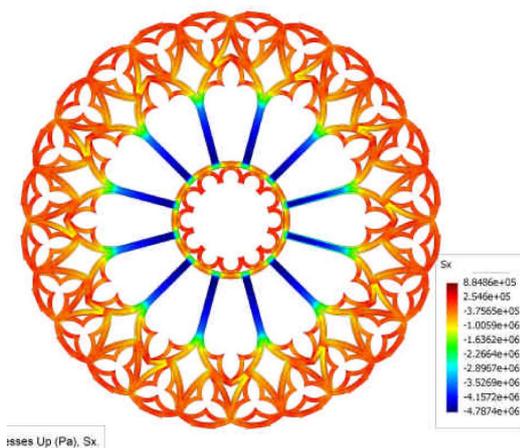
Esta misma situación también puede analizarse aplicando la teoría básica de placas desarrollada por Timoshenko para placas circulares sometidas a una carga uniformemente repartida. No obstante, la aplicación de esta formulación requiere la integración de esfuerzos según la separación entre radios.

$$M_{\max} = \frac{3+\nu}{16} qa^2 \quad M_r = \frac{q}{16} (3+\nu)(a^2 - r^2)^8$$

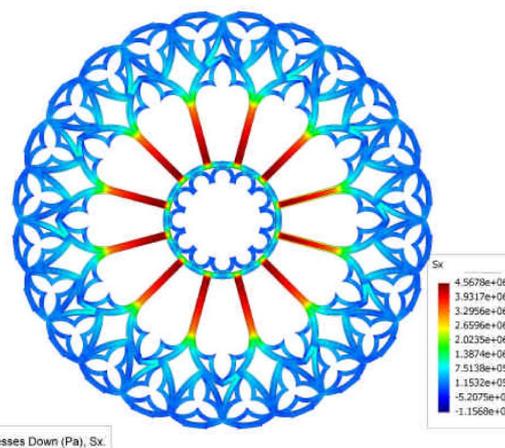
Donde:

- $M_{\max}$  Momento máximo (radial y tangencial) en el centro de la circunferencia.
- $M_r$  Momento radial en un punto r (distancia al centro de la circunferencia)
- $\nu$  Nu del material.
- q Carga uniformemente repartida perpendicular a la lámina.
- a Radio de la circunferencia.

Por lo tanto, a la hora de evaluar los resultados de tensiones en la cara interior (máximas tracciones debidas al viento), en estos mismos radios, en su intersección con el círculo interior, es donde se presentan las máximas tracciones.



sses Up (Pa), Sx



sses Down (Pa), Sx

Tensiones en la cara exterior

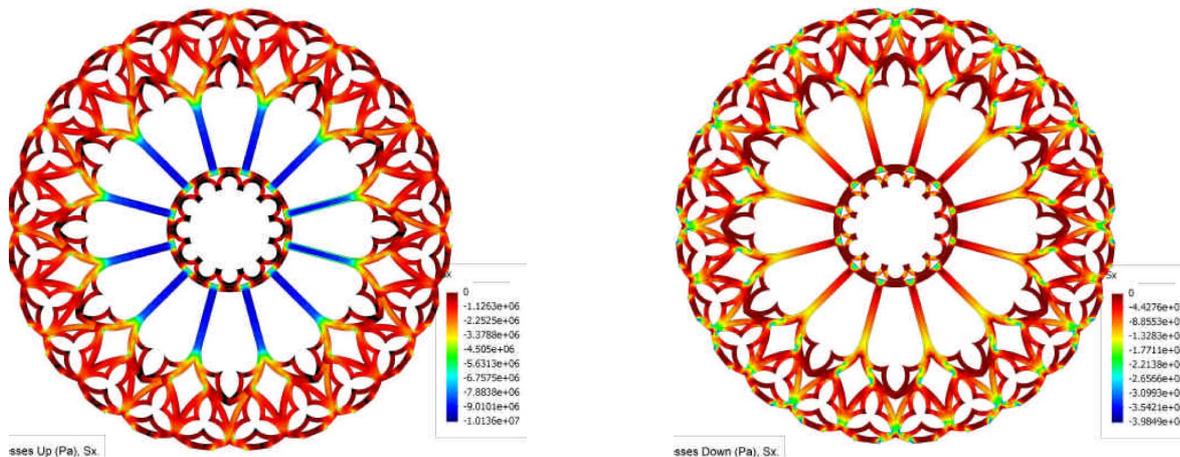
Tensiones en la cara interior

Es destacable que en ambos casos, a pesar de tener en cuenta en la evaluación de tensiones tanto el peso propio como el viento, prácticamente no hay diferencias tensionales entre los radios más verticales (los más cargados) y los semi-horizontales (menos cargados). Esto hace suponer que, en la estabilidad del rosetón el peso propio juega un papel poco relevante, dependiendo ésta

<sup>8</sup> TIMOSHENKO, S. – WOINOWSKI - KRIEGER, S. *Teoría de placas y láminas*. Espasa-Calpe, Madrid 1957, Pág. 76

fundamentalmente de la compresión debida al acañado entre piezas. De esta manera, el esfuerzo axial de compresión mínimo se deduce de la compensación de la totalidad de las tensiones de tracción debidas a la flexión.

Este valor se ha introducido como una carga térmica en un segundo modelo (de áreas equivalentes) para verificar que las tracciones de la cara interior han desaparecido, obteniendo los siguientes resultados:



*Tensiones en la cara exterior*

*Tensiones en la cara interior*

Como puede observarse, en la cara interior las tracciones han desaparecido y en la cara exterior las compresiones han aumentado proporcionalmente. De estos datos se puede concluir que lo que verdaderamente es relevante es la ausencia de tracciones y no el valor de las máximas compresiones y por otro lado, es de suponer que la existencia del rosetón desde su construcción a finales del S. XV hasta su reconstrucción en el S. XIX, avalan su estabilidad con un conveniente acañamiento entre las dovelas de la tracería.

Como última fase del análisis, para determinar un valor aproximado del espesor de las cuñas a introducir, aplicamos directamente la Ley de Hooke, de donde dedujimos que había que introducir cuñas de entre 3mm y 4mm en cada uno de los radios principales.

Para ello se utilizaron cuñas de acero inoxidable y se terminó de rejuntar la tracería con mortero de cal, intentando asimilar el color al de la piedra.

## **BIBLIOGRAFÍA:**

ERCADE-BRADENBURG, A. – PERNOUD, R. – GIMPEL, J. – BECHMANN, R. Villard de Honnecourt, Cuaderno. Ed. Akal, Madrid 2001.

GASOL, J.M. La Seu de Manresa: monografía històrica i guia descriptiva. Ed. Caixa d'Estalvis de Manresa, Manresa 1976.

HEYMAN, J. El esqueleto de piedra. Ed. Instituto Juan de Herrera, Madrid 1999

HEYMAN, J. Estructuras de fábrica. Ed. Instituto Juan de Herrera, Madrid 1995

HUERTA, S. Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Ed. Instituto Juan de Herrera, Madrid 2004

TIMOSHENKO, S, Resistencia de Materiales Tomo II. Ed. Espasa-Calpe, Madrid 1967

TIMOSHENKO, S. – WOJNOWSKI - KRIEGER, S. Teoría de placas y láminas. Ed. Espasa-Calpe, Madrid 1957

VIOLLET-LE-DUC, E. Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle. Tomos 1 y 8. Ed. Morell. Paris 1866

V.V.A.A. P.I.E.T. 70 Estructuras de fábrica. Instituto Eduardo Torroja, Madrid 1970

V.V.A.A. Essays on the History of Mechanics. Ed. Birkhauser, Basel 2003.