3 Restauración del rosetón gótico de la Seo de Manresa

Diego Martín y Pere Vidal

La estructura de un rosetón gótico tiene un funcionamiento que aparentemente no es tan evidente como el de otras estructuras de fábrica contemporáneas (arcos, bóvedas o contrafuertes). Un rosetón es una gran superficie formada por nervios de piedra tallada y sometida al empuje de viento aplicado perpendicu-



Fig. 1.

larmente sobre las vidrieras. En definitiva, se trata de una lámina de piedra de forma circular afectada por esfuerzos de flexión. Cualquier persona con un cierto conocimiento de las estructuras de fábrica históricas, puede entender que es un claro ejemplo de incompatibilidad entre esfuerzos y material ya que la piedra, así como las uniones entre piezas, son incapaces de asumir los esfuerzos de tracción derivados de la flexión. En este caso, el estudio del rosetón de la Seo de Manresa ha permitido exponer en este texto las pautas para comprender el comportamiento estructural de este elemento arquitectónico, cuya historia evidencia su correcto funcionamiento frente a las acciones que lo solicitan.

Así como sobre estructuras de fábrica medieval en general existe toda una historiografía referente a estudios sobre su estabilidad y comportamiento, acerca de rosetones no hay apenas documentación, que se resume en algunos grabados de época como los de Villard de Honnecourt.

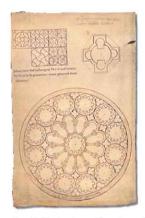




Fig. 2. Grabados referentes al trazado de rosetones del libro «Le carnet de Villard de Honnecourt» encontrados en la Xarxa Telemàtica Educativa de la Generalitat de Catalunya. | Gravats referents al traçat de rosetons del llibre «Le carnet de Villard de Honnecourt» trobats en la Xarxa Telemàtica Educativa de la Generalitat de Catalunya.

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

El rosetón fue construido en la última época de este periodo, coincidiendo la culminación de su construcción con la de la fachada principal a finales del siglo XV por el maestro de obras Martí d'Ibar. Como en muchos edificios históricos, el monumento ha sufrido



Fig. 3. Fachada principal de la Seo antes de la restauración. | Façana principal de la Seu abans de la restauració.



Fig. 4. Detalle de la estructura metálica de soporte provisional. | Detall de l'estructura metàl·lica de suport provisional.

a lo largo de la historia numerosos cambios, incluyendo también el rosetón principal. A finales del siglo XIX, éste fue reconstruido ya que su tracería y vidrieras quedaron seriamente dañadas durante un incendio. Posteriormente, esta nueva tracería quedó 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 por el 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 restauración global del monumento, se ha considerado la posibilidad de restituir la imagen exterior original del rosetón, eliminando esta estructura, en un inicio útil para evitar el desplome de la tracería frente a la acción del viento.



Fig. 5. Visión general del rosetón antes de la restauración. | Visió general del rosetó abans de la restauració.



Para ello el planteamiento seguido ha sido que, al mismo tiempo que se restituye la visión primitiva del rosetón, también se restituya su comportamiento estructural, de manera que no necesite 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 cada uno de los diferentes elementos en un monumento.

El mecanismo de estabilidad de un rosetón no deja de implicar conceptos con analogías actuales de un cierto grado de complejidad. El viento, perpendicular al plano del rosetón, produce esfuerzos de flexión de considerable magnitud sobre la lámina formada por la tracería de 6,20 m de diámetro. La carga de viento uniformemente repartida en toda la superficie produce en este caso un momento de flexión máximo en el centro de la circunferencia, que tiene que ser asumido por un sistema de piezas de piedra artificial 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 no supera los 15 cm de espesor y, por supuesto, no existe elemento continuo de unión que asuma las tracciones. Esta situación tensional, aunque no cuantificada por los constructores de catedrales, seguro que era bien intuida, por lo que, habitualmente, según se iba completando la tracería se retacaban unas piezas con otras. Esto produce un efecto de compresión inicial al conjunto que, aunque no se cuantificase, se presuponía suficiente para afrontar el empuje del viento. El re-acuñamiento entre piezas se puede observar que 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 postesado, 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 se produce por exceso de compresión, sino por la formación de diferentes rótulas debido a la incapacidad de la fábrica de asumir tracciones, hasta llegar al mecanismo. En otras palabras, mientras se garantice que no existan tracciones en ninguna sección, se puede asegurar la estabilidad del rosetón, independientemente de la capacidad máxima a compresión de la piedra artificial (generalmente bastante elevada). 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.

En el caso de la Seo de Manresa, para garantizar la situación de la tracería, se ha realizado un análisis del rosetón, a modo de verificación, mediante un programa de elementos finitos siguiendo el proceso expuesto a continuación.

En un primer modelo (de inercias equivalentes), se analizan los efectos del viento sobre la tracería únicamente solicitada por esta acción y el peso propio. Posteriormente, se valora el estado tensional de las secciones más desfavorables, cuantificando cuál debe ser el esfuerzo axil de compresión que debe introducirse para eliminar las tracciones. En un segundo modelo (de áreas equivalentes), se aplica el esfuerzo de compresión mediante una carga térmica virtual, verificando que todas las secciones de la cara del intradós quedan comprimidas.

Finalmente, para poder aplicar la compresión correctamente al rosetón, se calcula el acortamiento elástico debido a esta compresión, que se traduce en un número y espesor determinado de las cuñas a introducir, una vez que se haya recompuesto la tracería.

Parámetros de la sección

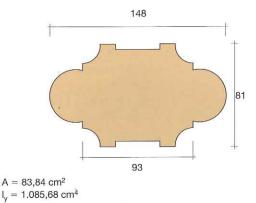


Fig. 6. Sección real de la tracería. | Secció real de la traceria.

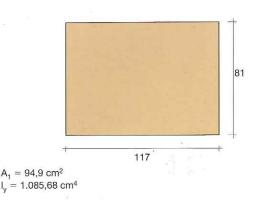


Fig. 7. Sección equivalente para el análisis. | Secció equivalent per a l'anàlisi.

Datos del material

Existe numerosa bibliografía referente a las características de las fábricas de piedra análogas a la existente (módulo de elasticidad, densidad, tensiones máximas admisibles) complementándolo con la realización de los pertinentes ensayos.

Condiciones de contorno

El modelo se ha articulado en todo su perímetro diferenciando la mitad superior, donde únicamente se impide el desplazamiento horizontal (marcas amarillas) para evitar que el rosetón quede virtualmente «colgado». En la parte inferior se ha impedido el desplazamiento horizontal y el vertical (marcas verdes), que asume las cargas gravitatorias del peso propio de la tracería.

Hipótesis de cálculo

Se han considerado las siguientes hipótesis de carga:

- Peso propio de piedra y vidrio.
- Viento: W_x = 80 kg/m² actuando perpendicularmente a la superficie del rosetón.

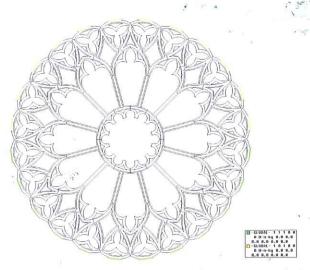


Fig. 8. Esquema para el análisis del rosetón. | Esquema per a l'anàlisi del rosetó.

Análisis

Del primer modelo 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 del mismo, por lo que, al no poder asumir la piedra este tipo de tensiones (ya que no se dispone de armaduras), se produciría una línea de articulación coincidente con la circunferencia del anillo interior.



- Asesoramiento en geotecnia y geología.
- Estudios geológicos, geotécnicos, hidrogeológicos, medioambientales y contaminación de suelos.
- Sondeos a rotación de testigo continuo, helicoidal y penetrométricos (DPSH y Borros).
- Estudio de patologías del terreno.
- Micropilotes, pilotes, inyecciones, anclajes, bulones.

Pje. Arraona 4, nave 3 - P.I. Santiga - 08210 Barberá del Vallés Tel. 93 729 89 75 - administracion@geotecnia.biz ¿Quiere saber por qué las más importantes firmas de arquitectura confían en nosotros?

La clave de nuestra compañía no es que tengamos las máquinas más modernas del mercado, sino que contamos con el mejor equipo de profesionales para conseguir los resultados más rigurosos y fiables.

93 729 89 75

Esto conlleva a un mecanismo de colapso ya que cuatro articulaciones (una en cada extremo y las otras dos en el centro de la luz), necesariamente están en desequilibrio.

Del diagrama de axiles debidos al peso propio se puede deducir que los puntos menos cargados (los cuatro radios más horizontales) son los más sensibles a que se produzca este mecanismo.

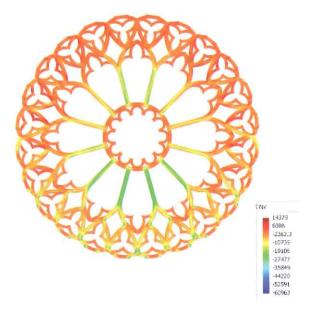


Fig. 9. Diagrama de axiles debidos al peso propio. | Diagrama d'axials deguts al pes propi.

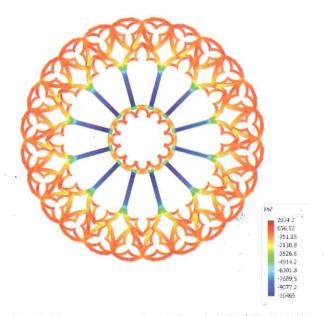


Fig. 10. Diagrama de momentos debidos al viento. | Diagrama de moments deguts al vent.

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.

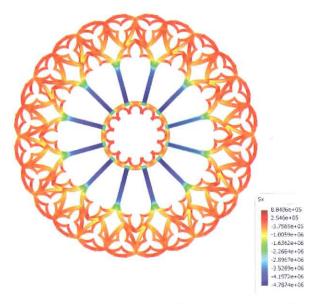


Fig. 11. Tensiones en la cara exterior. | Tensions en la cara exterior.

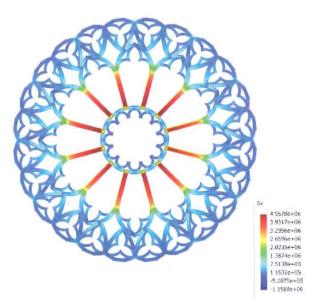


Fig. 12. Tensiones en la cara interior. | Tensions en la cara interior.

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 fundamentalmente de la compresión debida al acuñado entre piezas. De esta manera, el esfuerzo axil 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:

Restauració del rosetó gòtic de la Seu de Manresa

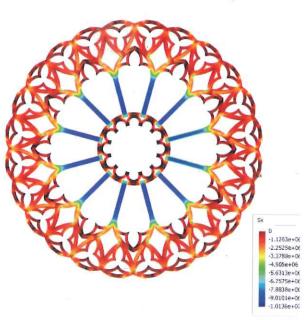


Fig. 13. Tensiones en la cara exterior. | Tensions en la cara exterior.

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

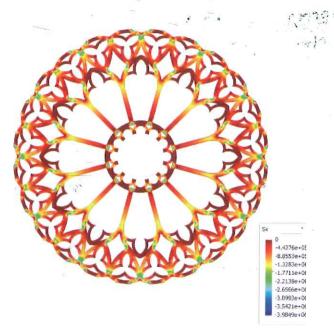


Fig. 14. Tensiones en la cara interior. | Tensions en la cara interior.

desde su construcción a finales del siglo XV hasta su reconstrucción en el siglo XIX, avalan su estabilidad con un conveniente acuñamiento entre las dovelas de la tracería.

Como última fase del análisis, para determinar un valor aproximado del espesor de las cuñas a introdu-



ESHOR, presente en todos los proyectos Innovadores en tecnología y medios para garantizar la calidad y seguridad

www.eshor.com

Viviendas Unifamiliares Complejos Hoteleros Edificios Institucionales Construcciones Industriales

Recintos Feriales Bloques de Viviendas Conjuntos Residenciales Complejos Deportivos



OFICINAS CENTRALES: Rúa Mareira Parc.S-1, Polígono Vilar Do Colo (Cabanas - A Coruña)

Telf. 981 34 34 52 - Fax 981 34 31 13 - E-mail: tecnicos@eshor.com

Delegación Cataluña y Baleares Telf. 609 24 38 61

Restauració del rosetó gòtic de la Seu de Manresa

cir, aplicamos directamente la Ley de Hooke, de donde dedujimos que había que introducir cuñas de entre 3 mm y 4 mm 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.

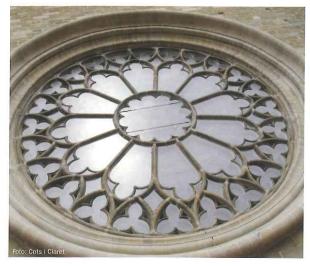


Fig. 15. Visión general del rosetón después de la restauración. | Visió general del rosetó després de la restauració.







Fig. 16.

RESTAURACIÓ DEL ROSETÓ GÒTIC DE LA SEU DE MANRESA

Diego Martín i Pere Vidal

L'estructura d'un rosetó gòtic té un funcionament que aparentment no és tan evident com el d'altres estructures de fàbrica contemporànies (arcs, voltes o contraforts). Un rosetó és una gran superficie formada per nervis de pedra tallada i sotmesa a l'embranzida del vent aplicat perpendicularment sobre les vidrieres. En definitiva, es tracta d'una làmina de pedra de forma circular afectada per esforços de flexió. Qualsevol persona amb un cert coneixement d'estructures de fàbrica històriques, pot entendre que és un clar exemple d'incompatibilitat entre esforços i material ja que la pedra, així com les unions entre peces, són incapaces d'assumir els esforços de tracció derivats de la flexió. En aquest cas, l'estudi del rosetó de la Seu de Manresa ha permès exposar en aquest text les pautes per a comprendre el comportament estructural d'aquest element arquitectònic, la història del qual evidencia el seu correcte funcionament davant de les accions que ho sol·liciten (fig. 1).

Així com sobre estructures de fàbrica medieval en general existeix tota una historiografia referent a estudis sobre la seva estabilitat i comportament, sobre rosetons no hi ha gairebé documentació, que es resumeix en alguns gravats d'època com els de Villard de Honnecourt (fig. 2).

Durant l'any 2005, dins del Pla Director de Restauració de la Seu de Manresa, es van abordar els treballs de restauració del gran rosetó d'estil gòtic de la façana principal. El Pla Director va ser redactat per l'arquitecte Francisco Javier Asarta, amb qui vam poder abordar diferents parts de la restauració del conjunt monumental.

El rosetó va ser construït a l'última època d'aquest període, coincidint la culminació de la seva construcció amb la de la façana principal a la fi del segle XV pel mestre d'obres Martí d'Ibar. Com en molts edificis històrics, el monument ha sofert al llarg de la història nombrosos canvis, incloent-hi també el rosetó principal. A la fi del segle XIX, aquest va ser reconstruït ja que la seva traceria i vidrieres van quedar seriosament danyades durant un incendi. Posteriorment, aquesta nova traceria va quedar també afectada a causa de la voladura del Pont Vell, situat al peu de la Seu, durant la Guerra Civil. Com a mesura preventiva per evitar el seu esfondrament per l'embranzida del vent, es va col·locar, no es coneix amb exactitud el moment, una estructura metàl·lica per la cara exterior a manera d'apuntalament provisional, que s'ha conservat fins al moment de la restauració. En abordar la restauració global del monument, s'ha considerat la possibilitat de restituir la imatge exterior original del rosetó, eliminant aquesta estructura, en un inici útil per a evitar el desplomament de la traceria davant l'acció del vent (fig. 3, 4 i 5).

Per això, el plantejament que s'ha seguit ha estat que, alhora que es restitueix la visió primitiva del rosetó, també es restitueixi el seu comportament estructural, de manera que no necessiti de cap estructura auxiliar per a ser estable davant del vent. No hi ha millor manera de restaurar que la de retornar la seva funció i consolidar el paper estructural de cadascun dels diferents elements en un monument.

El mecanisme d'estabilitat d'un rosetó no deixa d'implicar conceptes amb analogies actuals d'un cert grau de complexitat. El vent, perpendicular al plànol del rosetó, produeix esforços de flexió de considerable magnitud sobre la làmina formada per la traceria de 6,20 m de diàmetre. La càrrega de vent uniformement repartida en tota la superfície produeix en aquest cas un moment de flexió

Restauración del rosetón gótico de la Seo de Manresa

Restauració del rosetó gòtic de la Seu de Manresa

màxim en el centre de la circumferència, que ha de ser assumit per un sistema de peces de pedra artificial unides entre sí, només amb juntes de morter de calç i en el millor (o pitjor) dels casos amb alguna grapa de ferro abraçant la traceria. La secció d'aquestes peces no supera els 15 cm d'espessor i, per descomptat, no existeix element continu d'unió que assumeixi les traccions. Aquesta situació tensional, encara que no quantificada pels constructors de catedrals, segur que era ben intuïda, pel que, habitualment, segons s'anava completant la traceria s'acompanyaven amb el tac unes peces amb les altres. Això produeix un efecte de compressió inicial al conjunt que, encara que no es quantifiqués, es pressuposava suficient per a afrontar l'embranzida del vent. El re-encunyament entre peces es pot observar que s'ha anat produint al llarg de la història de l'edifici, inicialment amb tascons de fusta i posteriorment amb tascons de ferro i d'acer, amb l'objectiu de mantenir sempre una compressió interna entre peces que garanteixi la seva estabilitat.

Des d'un punt de vista mecànic modern, el comportament tensional d'una secció de la traceria s'assembla a un element postessat, on la compressió inicial assoleix compensar les traccions degudes a la flexió quan aquest entra en càrrega. El fet d'aplicar la compressió mitjançant l'escurçament elàstic, a causa d'encunyar sense cap tipus de control quantitatiu, no afectava a la seguretat del conjunt ja, que en estructures de fàbrica el col·lapse no es produeix per excés de compressió, sinó per la formació de diferents ròtules a causa de la incapacitat de la fàbrica d'assumir traccions, fins arribar al mecanisme. En d'altres paraules, mentre es garanteixi que no existeixen traccions en cap secció, es pot assegurar l'estabilitat del rosetó, independentment de la capacitat màxima a compressió de la pedra artificial (generalment bastant elevada). És de suposar que en algunes ocasions l'encunyament no haurà estat suficient per a comprimir de manera eficaç la traceria i més d'un rosetó haurà col·lapsat al llarg de la història.

En el cas de la Seu de Manresa, per a garantir la situació de la traceria, s'ha realitzat un anàlisi del rosetó, a manera de verificació, mitjançant un programa d'elements finits seguint el procés exposat a continuació.

En un primer model (d'inèrcies equivalents), s'analitzen els efectes del vent sobre la traceria únicament sol·licitada per aquesta acció i el pes propi. Posteriorment, es valora l'estat tensional de les seccions més desfavorables, quantificant quin ha de ser l'esforç axil de compressió que ha d'introduir-se per a eliminar les traccions. En un segon model (d'àrees equivalents), s'aplica l'esforç de compressió mitjançant una càrrega tèrmica virtual, verificant que totes les seccions de la cara del intradós queden comprimides.

Finalment, per a poder aplicar la compressió correctament al rosetó, es calcula l'escurçament elàstic a causa d'aquesta compressió, que es tradueix en un nombre i espessor determinat dels tascons a introduir, una vegada que s'hagi recompost la traceria.

Paràmetres de la secció

(Fig. 6 i 7.)

Dades del material

Existeix nombrosa bibliografia referent a les característiques de les fàbriques de pedra anàlogues a l'existent (mòdul d'elasticitat, densitat, tensions màximes admissible) complementant-lo amb la reallització dels pertinents assajos.

Condicions de contorn

El model s'ha articulat en tot el seu perímetre diferenciant la meitat superior, on únicament s'impedeix el desplaçament horitzontal (marques grogues) per a evitar que el rosetó quedi virtualment «penjat». En la part inferior s'ha impedit el desplaçament horitzontal i el vertical (marques verdes), que assumeix les càrregues gravitatòries del pes propi de la traceria (fig. 8).

Hipòtesi de càlcul

S'han considerat les següents hipòtesis de càrrega:

- · Pes propi de pedra i vidre.
- Vent: W_x = 80 kg/m² actuant perpendicularment a la superfície de la rosassa.

Anàlisi

Del primer model es dedueix que, sense cap compressió prèvia en el sistema, les traccions produïdes en la cara interna del rosetó no queden compensades pel pes propi del mateix, per la qual cosa, al no poder assumir la pedra aquest tipus de tensions (ja que no es disposa d'armadures), es produiria una línia d'articulació coincident amb la circumferència de l'anell interior.

Això comporta un mecanisme de col·lapse ja que quatre articulacions (una en cada extrem i les altres dues en el centre de la llum), necessàriament estan en desequilibri.

Del diagrama d'axials deguts al pes propi es pot deduir que els punts menys carregats (els quatre radis més horitzontals) són els més sensibles que es produeixi aquest mecanisme (fig. 9 i 10).

Per tant, a l'hora d'avaluar els resultats de tensions en la cara interior (màximes traccions degudes al vent), en aquests mateixos radis, en la seva intersecció amb el cercle interior, és on es presenten les màximes traccions (fig. 11 i 12).

És destacable que en ambdós casos, tot i tenir en compte en l'avaluació de tensions tant el pes propi com el vent, pràcticament no hi ha diferències tensionals entre els radis més verticals (els més carregats) i els semi-horitzontals (menys carregats). Això fa suposar que, en l'estabilitat del rosetó, el pes propi juga un paper poc rellevant, depenent aquesta fonamentalment de la compressió deguda a l'encunyament entre peces. D'aquesta manera, l'esforç axil de compressió mínim es dedueix de la compensació de la totalitat de les tensions de tracció degudes a la flexió.

Aquest valor s'ha introduït com una càrrega tèrmica en un segon model (d'àrees equivalents) per a verificar que les traccions de la cara interior han desaparegut, obtenint els següents resultats: figures 13 i 14.

Com es pot observar, en la cara interior les traccions han desaparegut i a la cara exterior les compressions han augmentat proporcionalment. D'aquestes dades es pot concloure que el que veritablement és rellevant és l'absència de traccions i no el valor de les màximes compressions i d'altra banda, és de suposar que l'existència del rosetó des de la seva construcció a finals del segle XV fins a la seva reconstrucció en el segle XIX, avalen la seva estabilitat amb un convenient encunyament entre les dovelles de la traceria.

Com a última fase de l'anàlisi, per a determinar un valor aproximat de l'espessor dels tascons a introduir, vam aplicar directament la Llei de Hooke, d'on vam deduir que calia introduir tascons d'entre 3 mm i 4 mm en cadascun dels radis principals.

Per això es van utilitzar tascons d'acer inoxidable i es va acabar de rejuntar la traceria amb morter de calç, intentant assimilar el color al de la pedra (fig. 15).