

TESIS DOCTORAL

Una Contribución a la Modelización y Virtualización Numérica de Estructuras Arquitectónicas

**(Una aplicación práctica a la estructura del Sagrario de la Catedral
de la Ciudad de México)**

**Tesis presentada por:
Arq. Francisco Muñoz Salinas**

Para obtener el grado de: Doctor Arquitecto

Director de Tesis: Javier López-Rey Laurens

Codirector: Jordi Maristany i Carreras

**Programa de Doctorado: Análisis de Estructuras Arquitectónicas
Departamento de Estructuras en la Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona
Universidad Politécnica de Cataluña**

Barcelona 2000

7

**Aplicación práctica a la modelización y análisis
de estructuras arquitectónicas**

(El Sagrario de la Catedral de México)

7.1 Comprobación y virtualización de los resultados obtenidos en el análisis del Sagrario

7.1.1 Introducción

La modelización de edificios históricos es una tarea ardua, ya que en la mayoría de ellos su geometría es compleja; y por tanto difícil de desarrollar. En esta investigación, se han generado una serie de interfaces, las cuales ayudan a que el proceso de generación de cualquier modelo numérico sea más rápido y más sencillo.

Las interfaces que se generaron en esta investigación pretenden cumplimentar las utilidades de los programas comerciales utilizados en el proceso de cálculo de estructuras. Estas interfaces, agilizan el proceso de análisis estructural; tanto para el preproceso como en la visualización de los resultados obtenidos que corresponde al postproceso.

En este apartado, se exponen los resultados numéricos obtenidos y se realiza un análisis de estos. El cálculo que se ejecutó en el Sagrario metropolitano de la ciudad de México, fue en primer orden; considerando el modelo como un elemento continuo. Hay que recordar que este estudio se realizó como una aplicación práctica para comprobar la eficiencia de las interfaces desarrolladas en esta investigación.

Como ya se ha comentado en el segundo apartado, el Sagrario es una construcción geoméricamente compleja y por tanto difícil de modelar. Además, si se realizará una simplificación del modelo numérico para su análisis, seguramente los resultados obtenidos serían poco fiables. Debido a eso, y como excusa para comprobar la eficiencia de las interfaces, en este apartado se expone un estudio de análisis estructural realizado.

A continuación, se detalla paso a paso el proceso para la visualización e interpretación de los resultados numérico-gráficos.

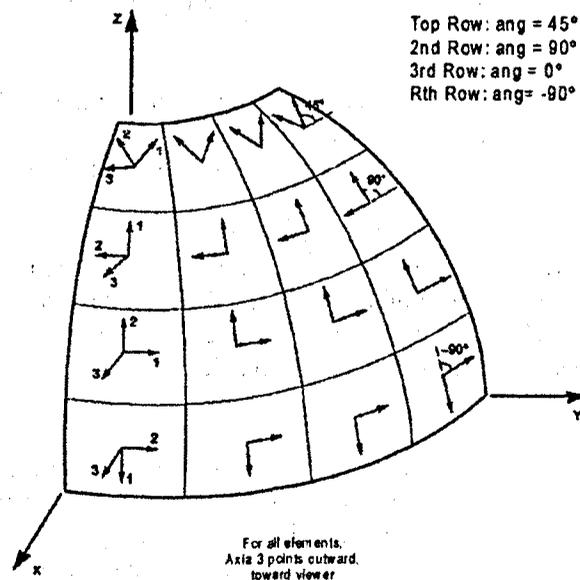
7.1.2 Interpretación y visualización de los resultados numérico-gráficos

En la interpretación y visualización de los resultados, una de las partes más importantes es la correcta asignación y definición del criterio de signo de los ejes locales; ya que eso se traduce en un análisis apto y de fácil comprensión.

7.1.2.1 Criterio de signo de ejes locales

La dirección de los ejes locales que forman su plano, esta determinada por la normal y el ángulo formado entre ellos.

En el modelo numérico del sagrario, y para mejorar el orden de visualización, se decidió trabajar con la normal perpendicular al plano en dirección hacia dentro de la estructura y formando un ángulo con respecto a ella de -90° , con el fin de provocar que el eje 1 siempre estuviera en la dirección vertical en todas y cada una de las partes que componen la estructura en su totalidad.



The Shell Element Coordinate Angle with Respect to the Default Orientation

Fig. 7.1.1 Definición del criterio de ejes locales a con respecto a la normal al plano -90°

7.1.3.1 Visualización de las deformaciones de la estructura

Dirección de los ejes en la cúpula central

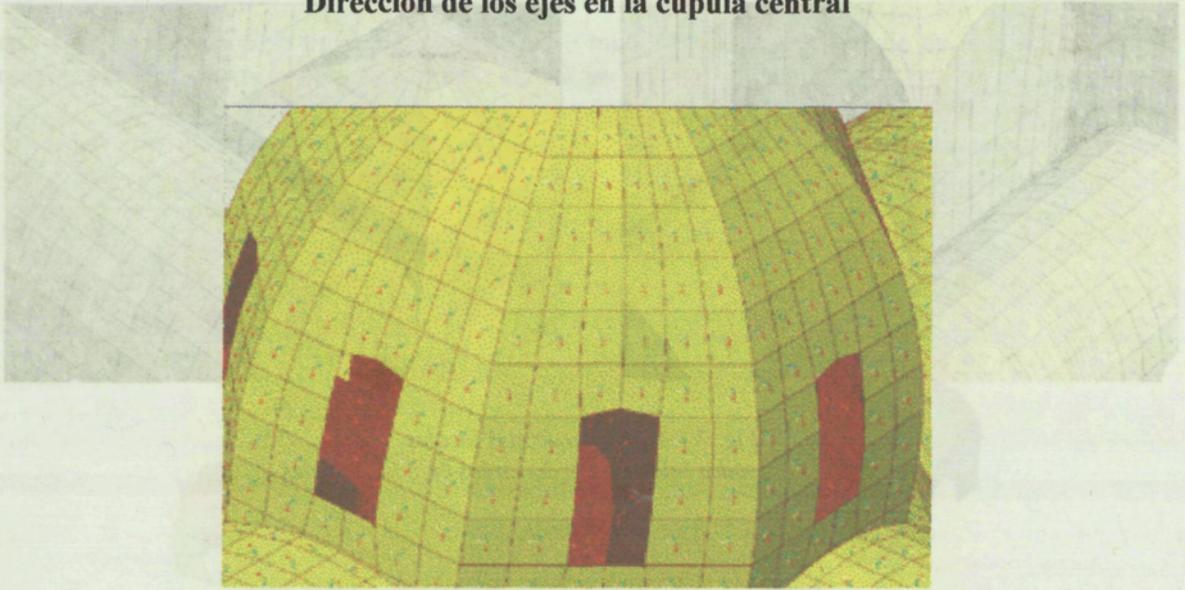
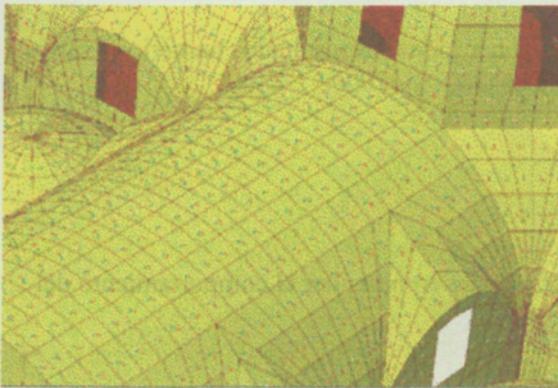


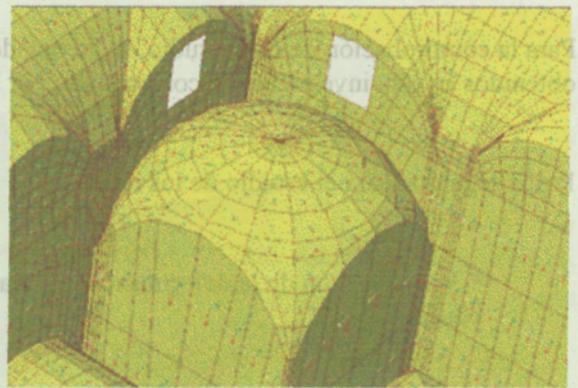
Fig. 7.1.2 ejes locales en la cúpula

7.1.3 Análisis de los resultados obtenidos del modelo numérico

Fig. 7.1.5 Deformación general en toda la estructura



a)



b)

Fig. 7.1.3 Criterio de ejes locales
a) En las bóvedas centrales b) En las cúpulas laterales

Fig. 7.1.6 Visualización de las deformaciones en la cúpula central, bóvedas centrales y columnas

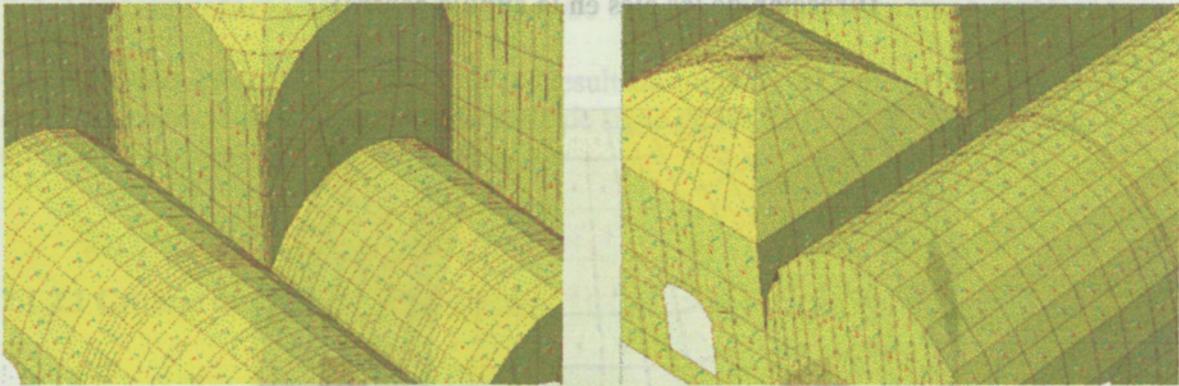


Fig. 7.1.4 Criterio de ejes locales
 a) En las bóvedas laterales b) En las cúpulas ojivales

7.1.3 Análisis de los resultados obtenidos del modelo numérico

Para la comprobación de este estudio, se ha optado por exponer todos los resultados numérico-gráficos obtenidos en esta investigación; comenzando por la interface *GiD-Sap2000*.

Pasos seguidos para el estudio de los resultados:

- * Visualización de la deformaciones de la estructura para comprender el comportamiento del edificio.
- * Interpretación de los esfuerzos obtenidos
- * hipótesis sobre el comportamiento estructural.

7.1.3.1 Visualización de las deformaciones de la estructura

Las deformaciones que se producen en el modelo numérico, son producto de un análisis en primer orden; considerando única y exclusivamente las cargas gravitatorias.

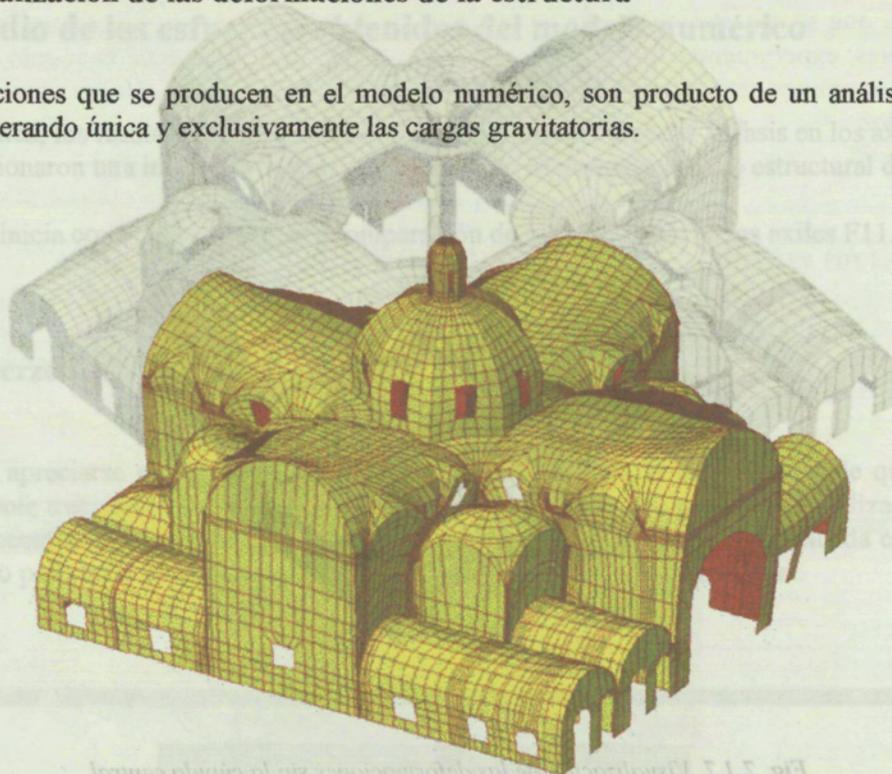


Fig. 7.1.5 Deformación general en toda la estructura

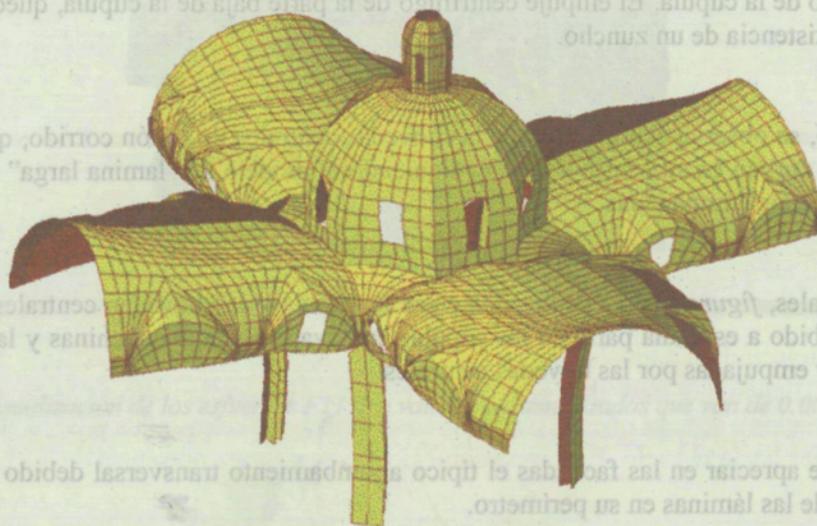


Fig. 7.1.6 Visualización de las deformaciones en la cúpula central, bóvedas centrales y columnas

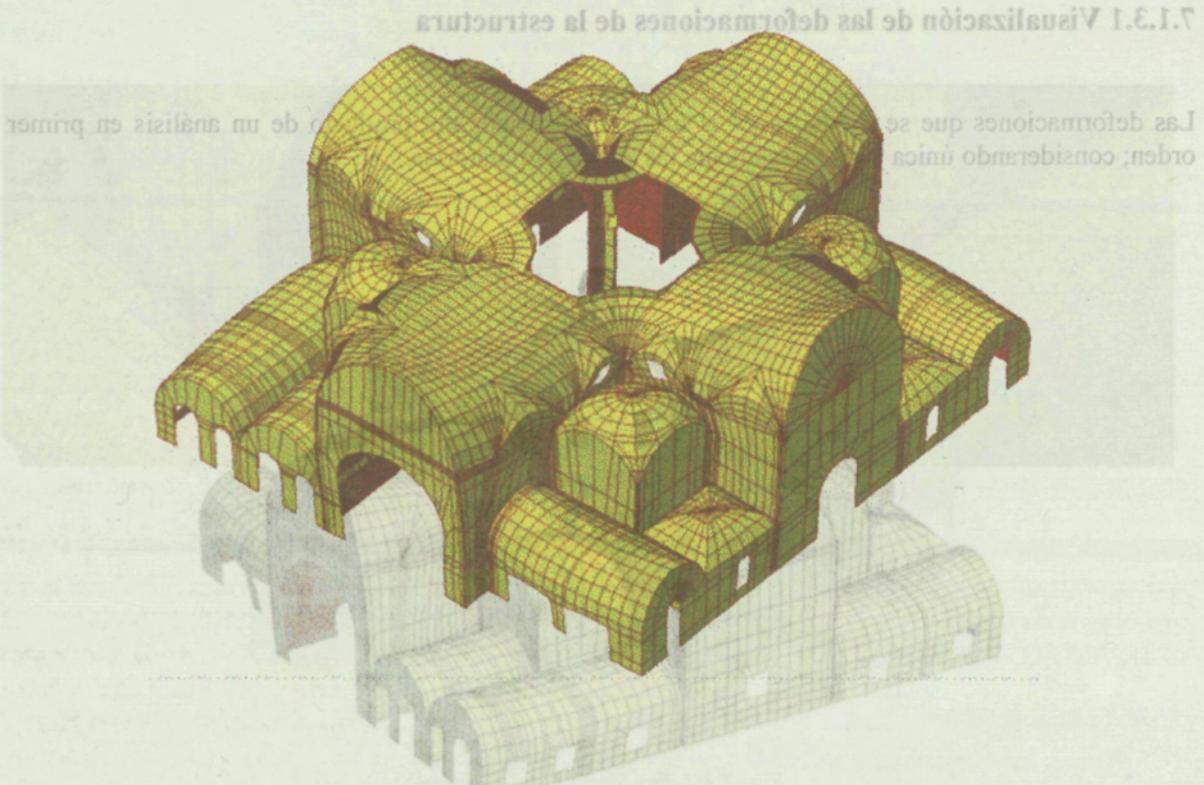


Fig. 7.1.7 Visualización de las deformaciones sin la cúpula central

Como puede observarse en las figuras 7.1.5, la cúpula central, debido a su peso, arrastra hacia abajo el centro de la construcción; provocando, posiblemente, una importante tracción en las pechinas situadas a 45° del octógono de la cúpula. El empuje centrífugo de la parte baja de la cúpula, queda compensado por la supuesta existencia de un zuncho.

En la figura 7.1.6, se observa claramente que las bóvedas centrales de cañón corrido, que parten de la cúpula central, se curvan en su centro y flectan siguiendo el modelo de "lamina larga" que propone la teoría para las bóvedas atimpanadas.

Las cúpulas laterales, figura 7.1.7, localizadas entre la cúpula y las bóvedas centrales, actúan como contrafuertes. Debido a eso, una parte de las cúpulas es llevada hacia las pechinas y la parte opuesta, se tracciona al ser empujadas por las bóvedas centrales.

Además, se puede apreciar en las fachadas el típico abombamiento transversal debido a los múltiples empotramientos de las láminas en su perímetro.

7.1.4 Estudio de los esfuerzos obtenidos del modelo numérico

Aquí se exponen, los resultados obtenidos del análisis. Haciendo especial énfasis en los axiles, ya que ellos proporcionaron una información más explícita sobre el comportamiento estructural del edificio.

El estudio se inicia con la visualización y comparación de los resultados de los axiles F11.

7.1.4.1 Esfuerzos axiles F11

Como puede apreciarse en la *figura 7.1.8*, no pasa desapercibida la constatación de que las únicas áreas claramente traccionadas en el sentido de los meridianos son: dos triángulos localizados en forma simétrica respecto a las diagonales a 45° que emergen del centro de la figura y ubicada en las cúpulas laterales; cuyo peso debe compensar los empujes producidos por la cúpula central.



Fig. 7.1.8 Visualización de los esfuerzos F11 con valores parametrizados que van de 0.00 a +4.00 1/m

La deformada que se muestra en la página anterior, se detecta que los vértices interiores, de estas cúpulas laterales, experimentan un fuerte descenso arrastradas por el peso de la cúpula central. Ello, explicaría las tracciones por “rebufo” en el vértice opuesto; pero lo cierto es que las zonas traccionadas salen a los lados.

7.1.4.2 Esfuerzos axiales F22

El abombamiento hacia fuera que experimentan las fibras, de todas las bóvedas, en la dirección de la directriz recta explican perfectamente las tracciones en estas zonas.

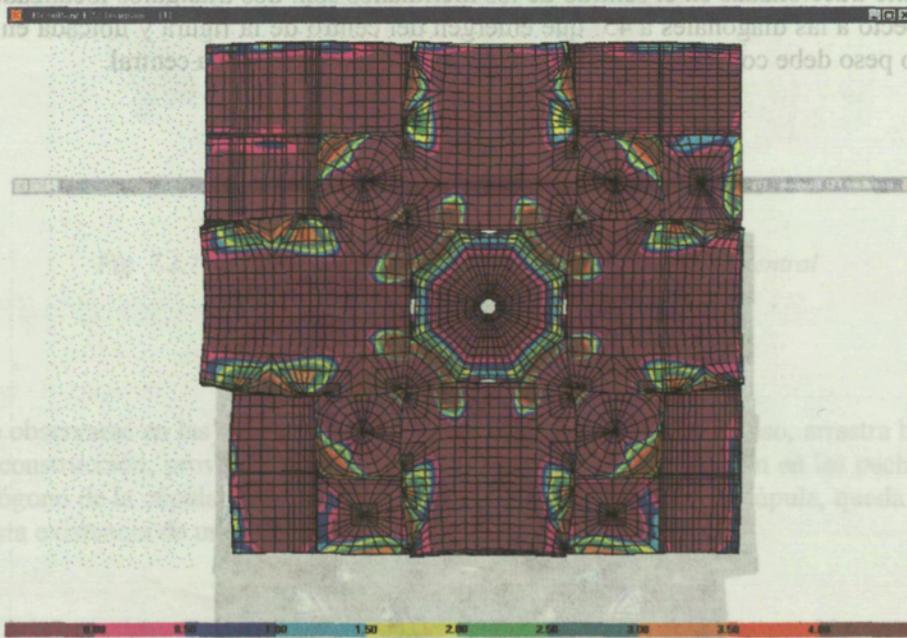


Fig. 7.1.9 Visualización de los esfuerzos F22 con valores parametrizados que van de 0.00 a +4.00 t/m

Los esfuerzos de tracción de paralelo que se observan en las zonas de las pechinas y su unión con la bóvedas centrales, tienen que estar provocados por el efecto de hundimiento de la cúpula central y se concentran en los lados a 45°; ya que vía pechinas son los más próximos a los pilares que canalizan las fuerzas gravitatorias hacia el suelo. Esta zona coincide con una fuerte presencia de V23.

También, como se aprecia en la figura 7.1.10, las tracciones que aparecen en los paralelos de la cúpula central son típicas del comportamiento estructural en este tipo de geometrías.

La misma deformación expansionista de las cúpulas laterales explican las tracciones de paralelo en la esquina de “sotavento” respecto a la cúpula central.

Tal vez, las tracciones producidas en estas cúpulas con lo que respecta a F11 en los triángulos máximos a esta zona sea un reflejo de F22 a través del módulo de Poisson.

Las zonas traccionadas en los perímetros laterales de las bóvedas centrales son provocadas por el abombamiento lateral de estas. Además, la continuidad de estas fibras queda rota por la presencia de los dos lunetos laterales.

En lo que respecta a la zona de fachada libres, aparece un efecto expansionista provocado por el empuje de las bóvedas.

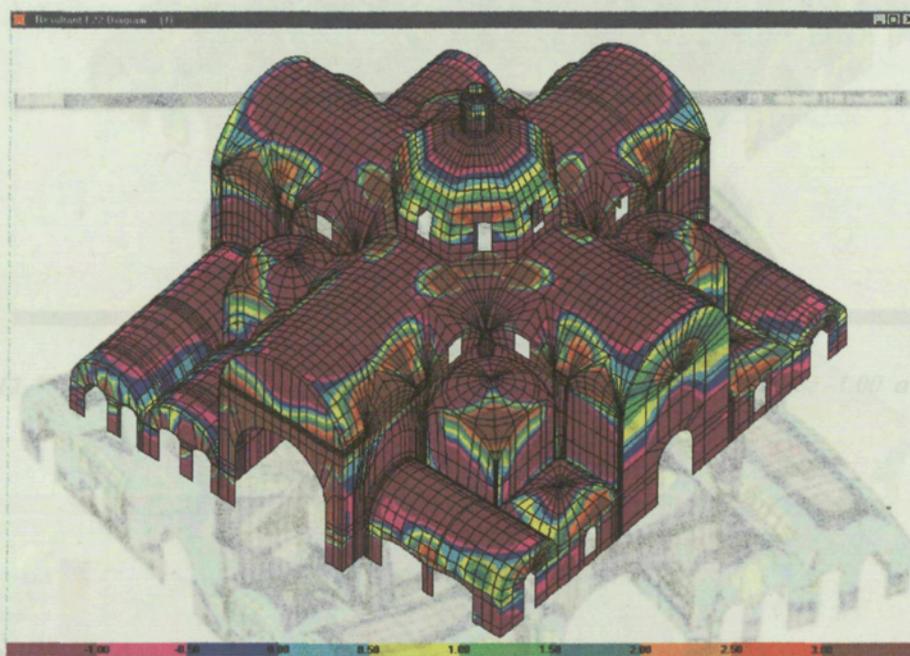


Fig. 7.1.10 Perspectiva de los esfuerzos F22 con valores parametrizados que van de -1.00 a +3.00 t/m

7.1.4.3 Momentos en la dirección M11

En la *figura 7.1.11*, se pueden apreciar claramente los esfuerzos correspondientes a los Momentos M11 en la dirección del eje 1.

Los lomos de las bóvedas soportan los momentos negativos en la dirección perpendicular a la directriz, pues los arcos pierden curvatura por el descenso general de la lámina.

La cúpula central, tiene un comportamiento membranar mucho más acusado que las bóvedas laterales. Prueba de ello son los bajos valores de momento que aparecen en ella.

Las zonas de máximo abombamiento positivo coinciden con los de los momentos M22. Y corresponden a las zonas de unión con los lunetos.

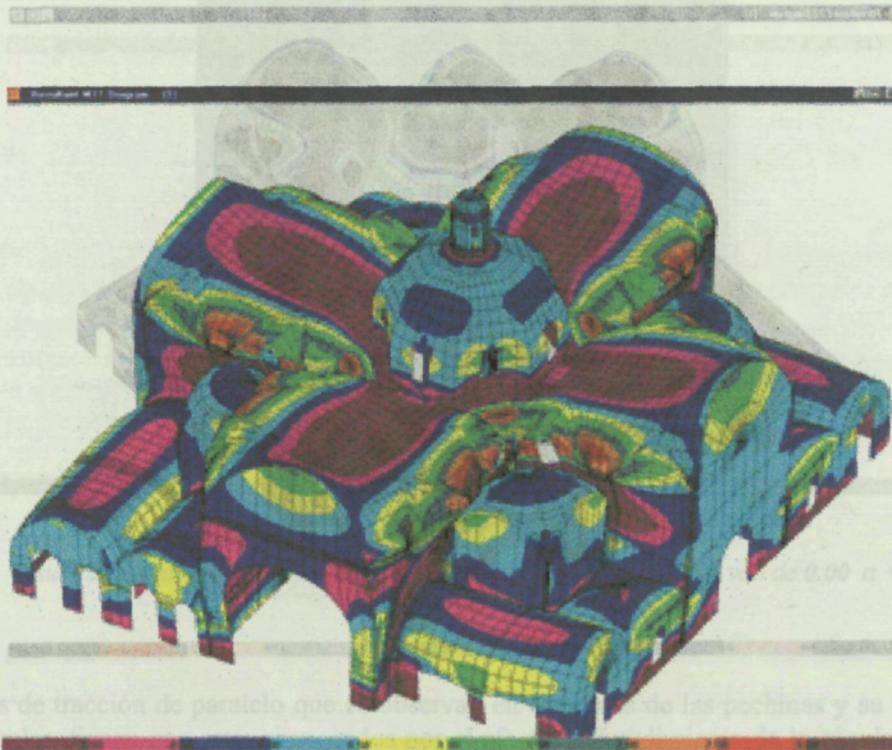


Fig. 7.1.11 Perspectiva de los Momentos M11 con valores parametrizados que van de -1.00 a +3.00 t/m

7.1.4.4 Momentos en la dirección M22

Los valores numéricos gráficos que se observan en la *figura 7.1.12*, representan los Momentos M22. Aquí se puede apreciar que las zonas de los lomos, con valores gráficos correspondientes a dichos esfuerzos, la curvatura de las fibras longitudinales es hacia dentro. Comportamiento clásico de este tipo de láminas, el cual se asimila al de una viga biempotrada.



Fig. 7.1.12 Perspectiva de los Momentos M22 con valores parametrizados que van de -1.00 a +1.00 t/m

7.1.5 Visualización de los resultados en el entorno de GiD

En este subapartado, se muestran varios de los resultados gráficos obtenidos mediante la misma *interface GiD-Sap2000* pero en el entorno del postproceso de *GiD*.

Es importante remarcar que el hecho de poder decidir cual es la mejor opción en la visualización del postproceso queda determinada por el usuario de estas interfaces. Sin embargo, no hay que olvidar que estas posibilidades de visualización es de gran ayuda a la hora de la interpretación de los resultados.

7.1.5.1 Esfuerzos axiales en el entorno del postproceso de *GiD*.

Con lo que respecta a la visualización de los resultados en el entorno del programa *GiD*, cabe recordar la gran utilidad que tiene este postproceso ya que permite una visualización más dinámica y muy sencilla de utilizar. Además *GiD*, contiene una herramientas gráficas muy potentes; herramientas que no proporciona *Sap2000*.

GiD, dentro de su postproceso permite la posibilidad de poder rotar la geometría, generando así una visualización más detallada de los resultados.

También permite observar las deformaciones conjuntamente con los valores tensionales. Esta opción, da la posibilidad de que el usuario pueda comprender el comportamiento de la estructura de una manera más sencilla.

Otra de las herramientas que *GiD* tiene, es la de poder realizar renders de la geometría así como de los resultados numérico-gráficos; y con ello generar imágenes en diferentes formatos para su edición.

Estas son algunas de las grandes ventajas que proporciona *GiD-Sap2000* en el postproceso del análisis estructural de edificios arquitectónicos.



Fig. 7.1.13 Visualización de los esfuerzos F11 en el postproceso de la interface *GiD-Sap2000*

Esfuerzos F22

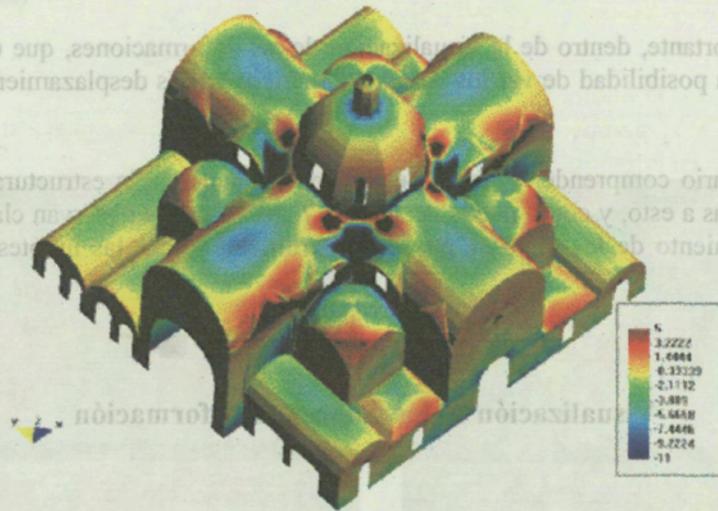


Fig. 7.1.14 Visualización de los esfuerzos F22 en el postproceso de la interface GiD-Sap2000

Esfuerzos F12

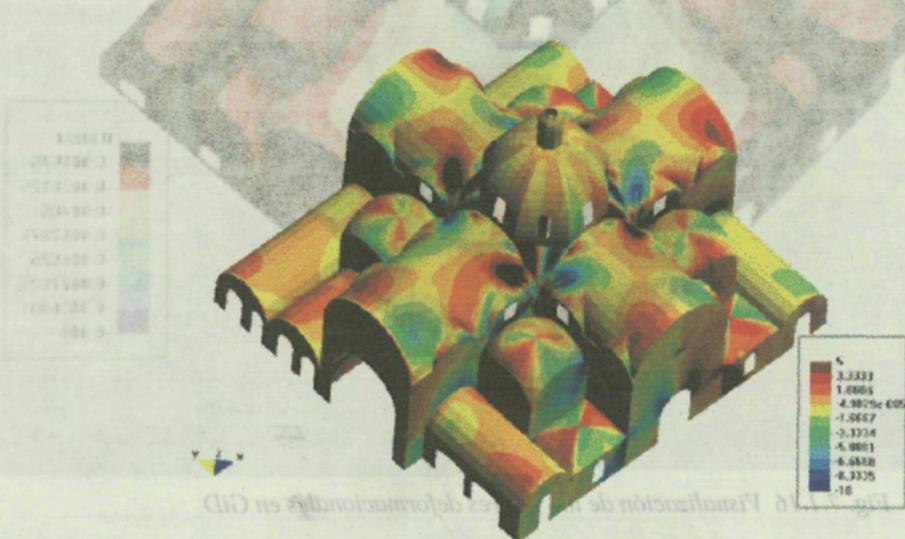


Fig. 7.1.15 Visualización de los esfuerzos F12 en el postproceso de la interface GiD-Sap2000



7.1.5.1 Esfuerzos axiales en el entorno F22

7.1.5.2 Visualización de los valores deformacionales

El aspecto más importante, dentro de la visualización de las deformaciones, que *GiD* implementa en su postproceso es: la posibilidad de ver los valores numéricos de los desplazamientos de cada uno de los nodos.

Esto permite al usuario comprender y asumir el comportamiento de la estructura provocado por su deformación. Gracias a esto, y como puede verse en la *figura 7.16*, se observan claramente los puntos de mayor desplazamiento de los nodos y por tanto permite sustentar las hipótesis propuestas en el análisis anterior.



Visualización de los valores de deformación

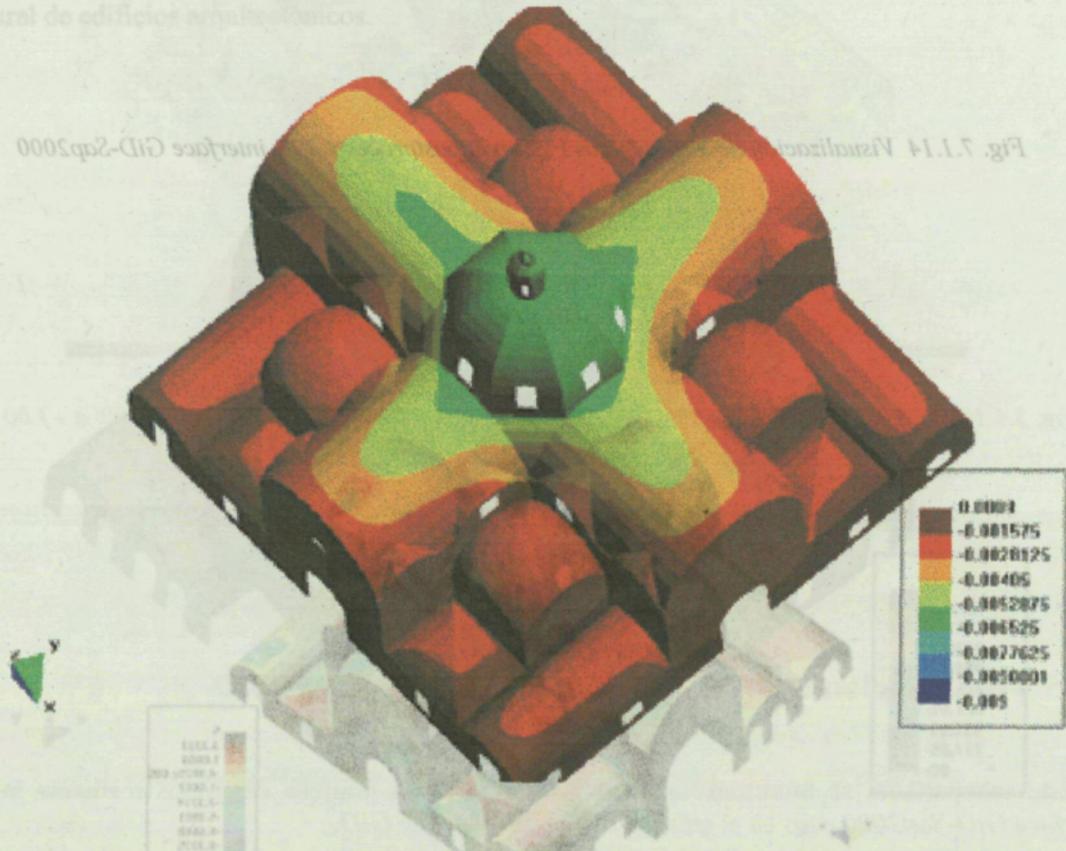


Fig. 7.1.16 Visualización de los valores deformacionales en GiD

Fig. 7.1.13 Visualización de los esfuerzos F11 en el postproceso de la interfaz GiD-Sap2000

Fig. 7.1.15 Visualización de los esfuerzos F12 en el postproceso de la interfaz GiD-Sap2000

7.1.6 Virtualización de los resultados numéricos obtenidos con la interface Sap2000-VRML

La interface Sap2000-VRML tiene la posibilidad de poder exportar el archivo generado, en este entorno, al programa 3D Studio Max. Esta alternativa a la interface, permite al usuario generar recorridos pánorámicos a la geometría y por consiguiente un control detallado del comportamiento estructural del edificio en cuestión.

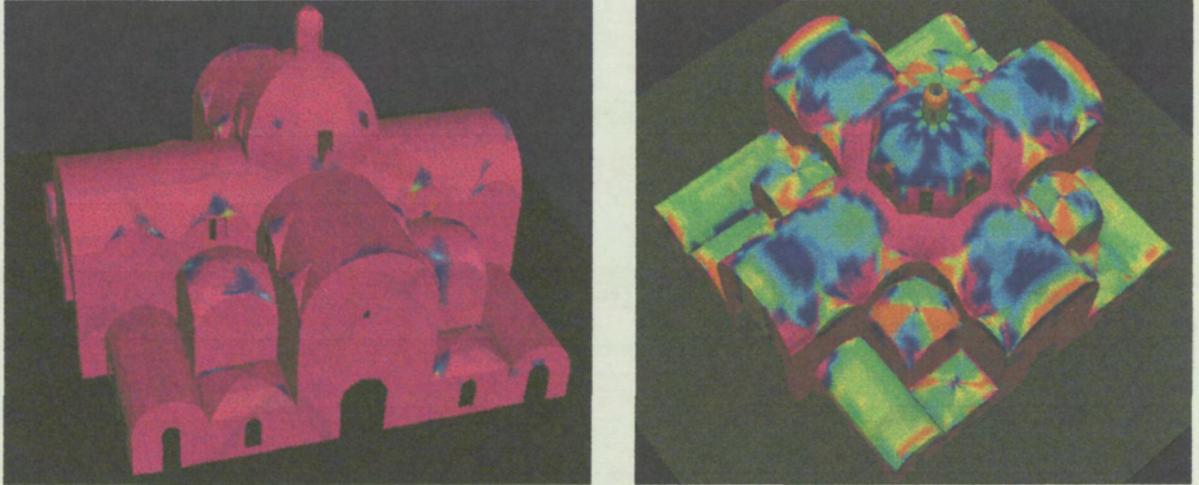


Fig. 7.1.17 Visualización de los esfuerzos F_{11} positivos y negativos mediante la interface Sap2000-VRML



Fig. 7.1.18 Visualización de los esfuerzos F_{22} positivos y negativos mediante la interface Sap2000-VRML

7.1.7 Virtualización de los resultados numéricos con la implementación de 3Dmax a partir del VRML

La interface *Sap2000-VRML*, tiene la posibilidad de poder exportar el archivo generado, en este entorno, al programa 3D Studio Max. Esta alternativa la interface, permite al usuario generar recorridos puntuales a la geometría y por consiguiente un control detallado del comportamiento estructural del edificio en cuestión.

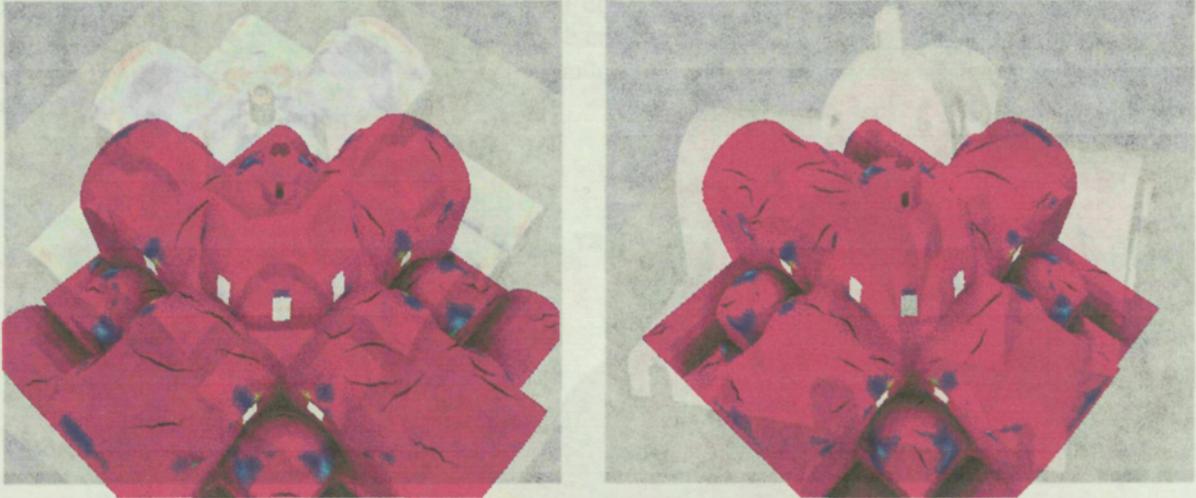


Fig. 7.1.19 Visualización de los esfuerzos F11 con la implementación VRML-3DMax



Fig. 7.1.20 Visualización de los esfuerzos F11 con la implementación VRML-3DMax

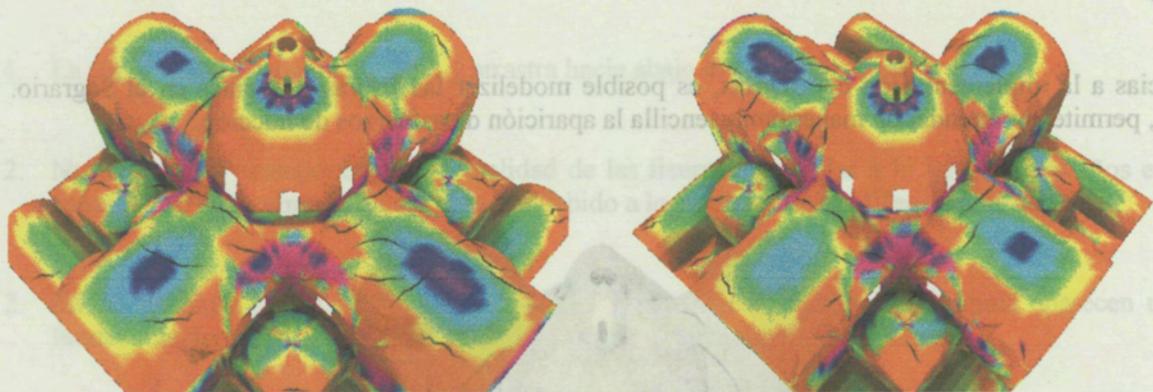


Fig. 7.1.21 Visualización de los esfuerzos F22 con la implementación VRML-3DMax

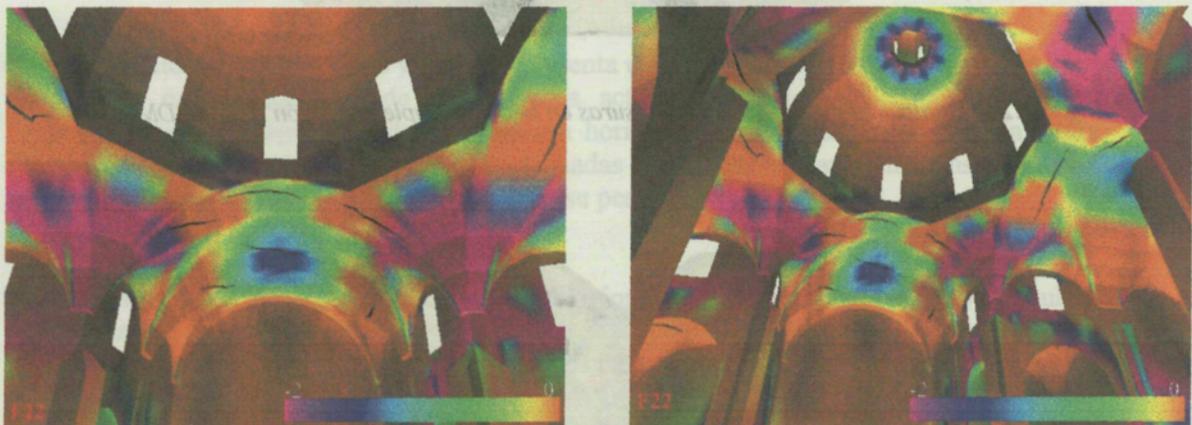


Fig. 7.1.22 Visualización interior de los esfuerzos F22 con la implementación VRML-3DMax

Fig. 7.1.24 Visualización interior-este de las fisuras con la implementación VRML-3DMax

7.1.7 Virtualización de los resultados numéricos con la implementación de 3Dmax a partir del VRML

7.1.8 Virtualización del modelo numérico con las fisuras aparecidas en el Sagrario

Gracias a la implementación del 3Dmax, es posible modelizar las fisuras existentes en el Sagrario. Ello, permite comprender de manera más sencilla la aparición de esfuerzos de tracción.



Fig. 7.1.23 Visualización nor-oeste de las fisuras en la con la implementación VRML-3DMax

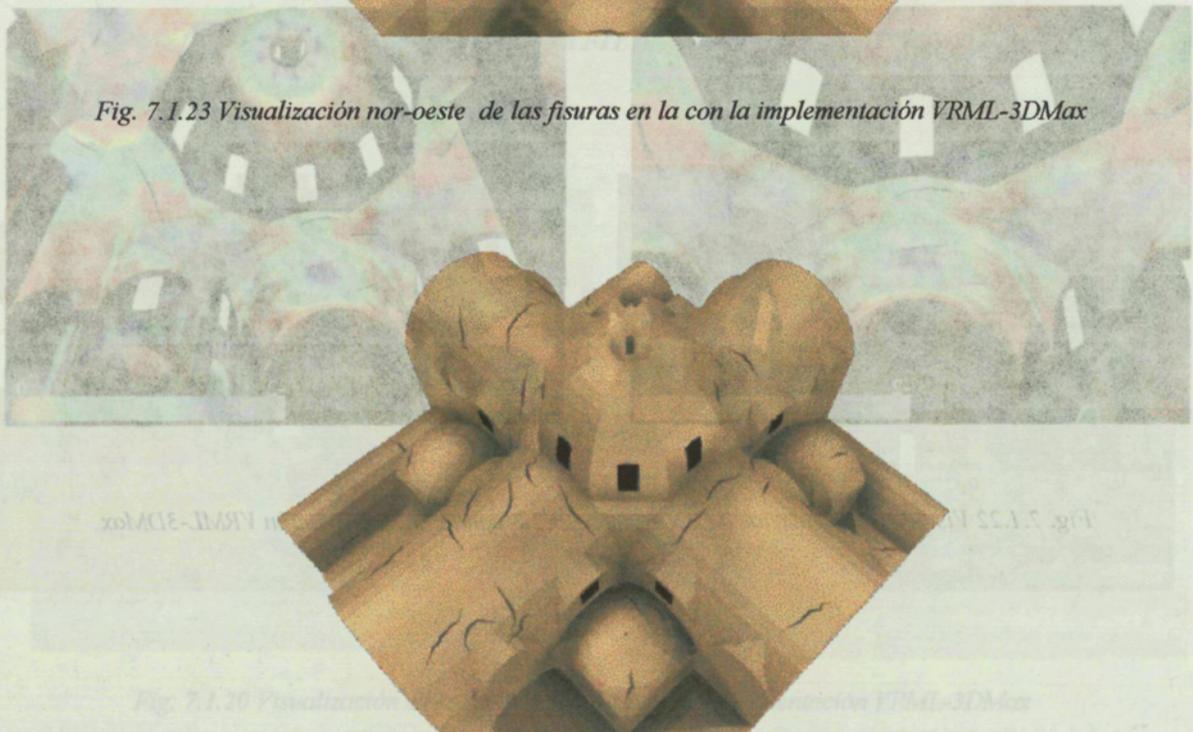


Fig. 7.1.24 Visualización sur-oeste de las fisuras con la implementación VRML-3DMax

7.1.9 Conclusiones sobre el comportamiento estructural del Sagrario

1. La cúpula central pesa demasiado y arrastra hacia abajo el centro de la construcción.
2. No es correcto presuponer que la totalidad de las fisuras aparecidas a lo largo de los años en el conjunto de las láminas de la cubierta sea debido a los asentamientos diferenciales del suelo.
3. En las pechinas situadas bajo los lados a 45 grados del octógono de la cúpula aparecen unas fuertes tracciones horizontales que explican la aparición de fisuras en esta zona.
4. Las cuatro bóvedas centrales de cañón corrido que parten de la cúpula central se abomban en su centro y flectan siguiendo el modelo de "lámina larga" que propone la teoría para las bóvedas atimpanadas.
5. Las cúpulas laterales de contrapeso situadas en el diedro entre las bóvedas y la cúpula central tiran hacia dentro arrastrada por la cúpula, pero se desplazan hacia fuera. Una tracción en el sentido de los paralelos explica las fisuras radiales en tres de las cúpulas laterales.
6. El conjunto de las 18 cúpulas y bóvedas presenta un comportamiento unitario que, en cierto modo, provoca que el conjunto de las fachadas actúe como tambor perimetral. Ello, explicaría probablemente la aparición de una tracción horizontal en todo el perímetro a la altura de las bóvedas más bajas. Hay además, en las fachadas el típico abombamiento transversal debido a los múltiples empotramientos de las láminas en su perímetro.
7. Finalmente, muchas de las conclusiones anteriores no hubieran sido posible formularlas sin la posibilidad de una visión total y unitaria de todo el edificio. Cosa que ha hecho posible un método de análisis tan actual como el de los elementos finitos.

El primer paso en el desarrollo de un modelo numérico es la definición de la geometría de la estructura. Esto se puede hacer a través de la descripción de la geometría de la estructura en términos de coordenadas cartesianas o mediante el uso de un lenguaje de descripción de geometría (GDAL).

Una vez definida la geometría, el siguiente paso es la discretización de la estructura en elementos finitos. Esto se puede hacer a través de la definición de una malla de elementos finitos que cubra toda la geometría de la estructura.

El tercer paso es la definición de las propiedades materiales de los elementos finitos. Esto se puede hacer a través de la definición de un modelo constitutivo que relacione el esfuerzo con la deformación de los elementos finitos.

El cuarto paso es la definición de las condiciones de contorno de la estructura. Esto se puede hacer a través de la definición de los nodos de la estructura que están sujetos a desplazamientos prescritos o fuerzas prescritas.

El quinto paso es la resolución del problema de valores de contorno. Esto se puede hacer a través de la resolución de un sistema de ecuaciones algebraicas que relaciona los desplazamientos de los nodos de la estructura con las fuerzas prescritas.

El sexto y último paso es la post-procesado de los resultados. Esto se puede hacer a través de la definición de los campos de desplazamiento, esfuerzo y deformación de la estructura.