

Recuperación geométrica de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos /

Fernando López Carmona / Agustín Hernández Hernández

FLC, Doctor en arquitectura. Profesor emérito de la Facultad de Arquitectura, UNAM, Premio UNAM 1998.

AHH, Doctor en arquitectura. Profesor de la Facultad de Arquitectura, UNAM.

Vista interior de la Catedral con el apuntalamiento metálico que tuvo durante diez años, del cual fue recientemente liberada. Fotos: Juan Ignacio del Cuelo



El monumento religioso más importante del país ha sido salvado, tras un trabajo de diez años, de un inminente derrumbe. La participación de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, a través de un equipo encabezado por Fernando López Carmona, fue fundamental en este salvamento.

Durante diez años hemos trabajado en el rescate geométrico de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos, desde el diagnóstico hasta la terminación del proceso. La comprensión de la forma construida, como consecuencia del programa general de la arquitectura, define en un tiempo y lugar el programa particular de trabajo para intervenir un edificio del pasado. Particularizar dicho programa exige analizar la geometría del edificio, la trayectoria de las fuerzas que lo solicitan y cómo el material de ese conjunto que resiste por forma, se organiza para satisfacer la estabilidad y producir los locales para las funciones que debe cumplir. Después, para cuantificar los esfuerzos y corregir las deformaciones de los elementos y las partes del conjunto, se deben leer en esa geometría los síntomas que definen su conducta como esqueleto resistente; hay signos legibles directamente y otros que deben ubicarse para establecer el programa, con base en una hipótesis comprobable. Existen para ello métodos refinados de la ingeniería estructural, pero cuando se elabora el plan de trabajo no están disponibles por costosos y lentos, lo que hace necesarios instrumentos accesibles que permitan completar el cuadro de tales síntomas y fundamentar una hipótesis. En el trabajo de la Catedral padecimos esas carencias y buscamos sustituirlas. Lo relatamos a continuación.

Este trabajo exigió entender las razones que generaron la forma construida, el programa general de la arquitectura en su momento, y el programa particular del edificio. Este último ha permanecido casi invariable, pero aquel, el general, refleja el tiempo transcurrido desde que se concibió, tanto en los recursos económicos y sociales disponibles, como en los materiales y procedimientos. No menos importante es el cambio físico del entorno urbano, el número de sus habitantes y los cambios en los hábitos de vida.

El programa general de la arquitectura establece, en un lugar y en un tiempo, lo que es posible lograr con los recursos disponibles, de los cuales son importantes la ciencia de los materiales, la ciencia de la construcción y el conocimiento de la tecnología, que al determinar



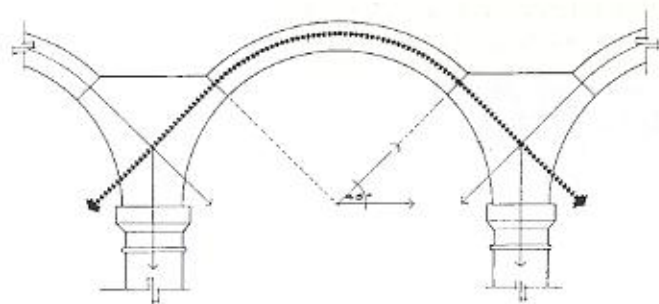
Catedral y Sagrario Metropolitanos.

las formas adecuadas, definen el alfabeto para el discurso arquitectónico de un momento.

El programa particular del edificio se fundamenta en convicciones filosóficas, pero también en las condiciones tecnológicas y científicas de los arquitectos. En la restauración hay que atender a ambos aspectos; debemos respetar la anatomía del edificio, pero hay que tener en cuenta aún más los conceptos en que fundamentaron su permanencia quienes lo construyeron.

Del esfuerzo por edificar obtuvimos orden, disciplina y métodos de organización; de las limitaciones de los materiales aprendimos la resistencia por forma, las estereoestructuras, y no hemos cesado de cultivarlas, aunque hoy disponemos de hierro y sabemos presforzar los pétreos y aun el hierro.

Del esfuerzo por entender el mundo en que vivimos desarrollamos la geometría, y del rigor de sus demostraciones aprendimos a plantear, analizar y concluir las leyes que organizan nuestra percepción del mundo. Así, la geometría es un lenguaje en el que percibimos orden, solidez y armonía en nuestro trabajo, valores que compartimos con todos; es por lo tanto, un lenguaje intemporal y universal. Pero la acción edificadora se efectúa en un lugar y en un tiempo que condicionan los métodos y los procedimientos que los hacen posibles.



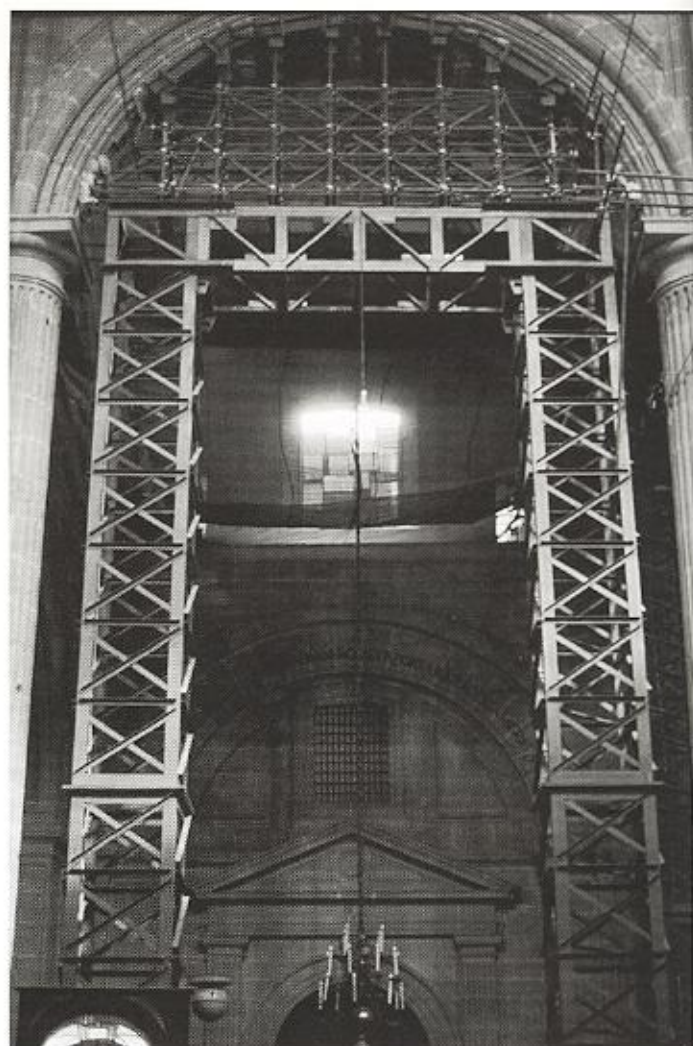
Arco original.



Deformación por disminución de la luz.
 Grieta por extrados en la clave.
 Grieta por intrados en arranques; ascenso de la clave pero reducción de la flecha real.



Deformación por aumento de la luz.
 Grieta por intrados en la clave.
 Grieta por extrados en arranques; descenso en la clave pero incremento en la flecha real.



Eso que se puede leer en la obra construida exige conocer el oficio y haberlo practicado, saber que al campo de lo posible lo acotan los materiales disponibles, la tecnología para procesarlos y el mercado de trabajo.

Las edificaciones pétreas resisten por forma, permanecen por masa y subsisten como mecanismos confinados entre masas restrictivas. Son eminentemente isostáticas y el mantenimiento que se les prodiga no debe alterar esas condiciones que son las premisas para que permanezcan. Respetar esas premisas significa respetar la cultura de quienes las construyeron.

Al concebir el volumen hueco para la ocupación humana, en un tiempo y en un lugar, la forma construida debe ofrecer protección y comodidad. Los medios disponibles imponen los materiales y procedimientos de construcción y dejan la tecnología de los materiales como el argumento para realizarlo. Entendida esta tecnología como conocimiento activo que permite el discurso de la cultura a la que los constructores pertenecen, cultura que se desarrolla en el tiempo, en todas partes tiene rasgos comunes con matices particulares.

La forma natural de los materiales pétreos para cubrir una habitación son los arcos; del uso adecuado de los arcos derivan bóvedas, cúpulas, contrafuertes y botareles. Su disposición, impuesta por las leyes físicas, determina la organización espacial de recintos abovedados, claustros porticados, vanos y macizos en los edificios.

Ese conocimiento activo permite, al manejar la proporción y matizarla con el detalle, la percepción del orden y la organización en los edificios como un eco de cultura que identifica a las sociedades que los crean.

En el magno recinto abovedado de la Catedral percibimos cómo lo circunda un sistema de contrafuertes que garantiza la restricción de los empujes horizontales de las cubiertas; también percibimos la concepción del proceso constructivo con el razonamiento anticipado del flujo de recursos humanos y financieros durante la construcción y las previsiones de supervivencia frente a sismos y hundimientos del suelo en la excelente estereotomía del edificio, que implica un mecanismo de adecuación permanente de la geometría del sistema, por la aparición de las "rótulas frágiles" características de las mamposterías, todo confinado dentro del cinturón restrictivo que lo circunda.

La resistencia por forma exige una explicación al cambio de las cargas que inducen los sismos y al cambio de forma que significan los hundimientos.

Los materiales birresistentes contemporáneos capaces de flexar alcanzan estados de falla dúctil que redistribuyen las solicitaciones extremas; de modo análogo las mamposterías alcanzan fallas frágiles y generan mecanismos que aceptan deformaciones inverosímiles con una conducta isostática, mientras permanezcan las restricciones que evitan la ruina del mecanismo.

Identificar esa conducta en los monumentos del pasado, entender cómo actúa, analizar y cuantificar los límites tolerables del fenómeno, es necesario para garantizar la seguridad de quienes los usan, sin atentar contra la postura profesional de quienes los crearon.

La transposición del concepto de conducta dúctil al concepto de conducta frágil exige entender que las rótulas definen la capacidad de momento y la capaci-

dad para soportar las fuerzas axiales que las solicitan, tanto en las dúctiles como en las frágiles; y si en las dúctiles la plastificación de una última rótula significa la ruina, en los sistemas frágiles, la eliminación de las restricciones trae la ruina.

En el partido arquitectónico de este recinto monumental abovedado y pétreo se puede demostrar que las restricciones determinan la forma construida, y que siguiendo esos esquemas con habilidad compositiva, aquellos arquitectos organizaron las condiciones sociales y económicas para alcanzar las metas de expresión formal.

En la Catedral Metropolitana se puede leer un proceso constructivo orientado para crear una cadena de elementos que produce finalmente un gran recinto abovedado, rodeado por el sistema restrictivo que lo circunda; también las decisiones formales conducentes a armonizar los factores sociales y económicos con la meta propuesta y, por último, el manejo ornamental para conducir la percepción de los usuarios al valorar las partes de lo edificado siguiendo el esquema programático.

Entendiendo así el monumento y ante el cambio en la conducta del suelo que amenaza con frustrar la acción restrictiva de los elementos perimetrales, resulta claro que es en el suelo donde debe actuarse para reponer las relaciones geométricas de las partes organizadas como el sistema arquitectónico que resuelve el programa catedralicio. También resulta de esta actitud la necesidad de respetar y ponderar en todo su valor las premisas de conducta y mantenimiento de la estructura en que se apoya la solución arquitectónica.

De la revisión conducente a comprender las decisiones de los arquitectos ante el hundimiento del pedraplen y la inescapable supervisión del Virrey, se debe aceptar que ellos confiaban en la conducta estructural de lo que proponían. Sin duda estaba en plena evolución esa confianza en la conducta del edificio, así lo demuestran otros edificios en la ciudad y también los cambios en los alzados desde el proyecto inicial de Arciniega hasta el volumen final abovedado que Manuel Toussaint atribuye a Miguel de Agüero; sus antecedentes en la Catedral de Mérida y el refinamiento que exhiben las bóvedas en la Catedral de México avalan la afirmación de Toussaint.

En lo expuesto se fundamenta la decisión de subexcavar las zonas duras centrales del recinto abovedado y después consolidar ese estado obtenido del suelo mediante inyecciones de mortero en las zonas blandas. Lo anterior debe hacerse respetando al máximo la conducta estructural del monumento, siguiendo la metodología de mantenimiento que consiste en volver a aglomerar los áridos en las zonas dañadas inyectando cementantes y después de repuesta la geometría hasta donde fue posible, eliminar el fenómeno del hundimiento diferencial.

De la lectura de la conducta de estas construcciones se deriva la necesidad de no introducir otros materiales y solamente reponer las relaciones originales entre sus elementos. La evolución del suelo que apoya a la Catedral cambió esas relaciones; reponer la geometría de lo edificado y evitar que se repitan los daños que el cambio del suelo produce fue el programa que se cumplió.

Indudablemente la corrección geométrica fue posible por la capacidad profesional de los geotécnicos, pero no es menos importante la aceptación de que la conducta frágil lo haría posible.

Mucho menos espectacular, pero tanto o más difícil, fue vencer la tentación de intervenir en el proceso de reversión y aceptar lo que el cambio en el suelo indujo a la superestructura. Sin duda fueron los datos periódicos de la conducta del sistema, como el control de las presiones sobre los apuntalamientos al demostrar que el mecanismo confinado hacía ascender las claves del sistema abovedado, lo que lo hizo posible. Lo anterior condujo, al final, a fortificar el monumento con el método tradicional de aglomerar con cementante los áridos en las zonas dañadas.

En las pilastras que, como parte del mecanismo, exhiben rótulas frágiles, también por el método de construcción, son probables los huecos en el mortero de asiento de los sillares, por ello se inyectaron a presiones de 25 kg/cm² las juntas. Esto garantiza que la totalidad de la sección disponible actuará, y que los niveles de esfuerzo serán los mínimos necesarios. Se menciona esto como un ejemplo de intervención atinada, que seguramente hará óptima la condición de las pilastras sin cambiar su conducta.

En 1940 se introdujo acero en las soleras de liga de la cimentación. Quienes lo hicieron buscaban capacitar para la flexión las soleras de liga de la cimentación para descargar de tierra las celdas. De allí se derivó la propuesta de subexcavar para revertir los hundimientos de 1940 a 1990, confiando en que la ductilidad de ese hierro evitaría que se dislocaran las soleras, lo que no se puede afirmar de las deformaciones de 1665 a 1940. Ahora, después de explorar la losa tapa de la cripta, se propone ligarlas para garantizar la continuidad del refuerzo de hierro de esas losas en toda la superficie del monumento, que no existe actualmente porque se construyeron en etapas.

Además, se analiza la posible inclusión y adición de más hierro en el lecho superior de las soleras. Sin embargo, el éxito de las inyecciones de mortero al suelo apunta a que esto no sea necesario, porque el monumento ya no quedará sometido a hundimientos diferenciales. Por lo tanto, la homogeneización del suelo parece alcanzable, y sin duda es la más eficaz cura y remedio al problema.

Cuando del proceso de comprensión pasamos a la acción, debemos comprobar las premisas del juicio y las magnitudes de las fuerzas que solicitan a los elementos, sin olvidar reconocer que las mamposterías son incapaces de tomar flexión por su debilidad a tracción, que la estructura ya está rota y que esa es la condición final y única que resulta confiable.

Atendiendo a esa condición, las rótulas definen puntos dentro del sistema por donde pasan los polígonos funiculares; para el análisis, es un sistema isostático determinado. Los mecanismos confinados irán hasta donde las restricciones lo permitan y así la acción espacial del sistema resuelve las solicitaciones gravitacionales y las solicitaciones sísmicas, siempre como un sistema isostático que es la condición que impone la fragilidad del material.

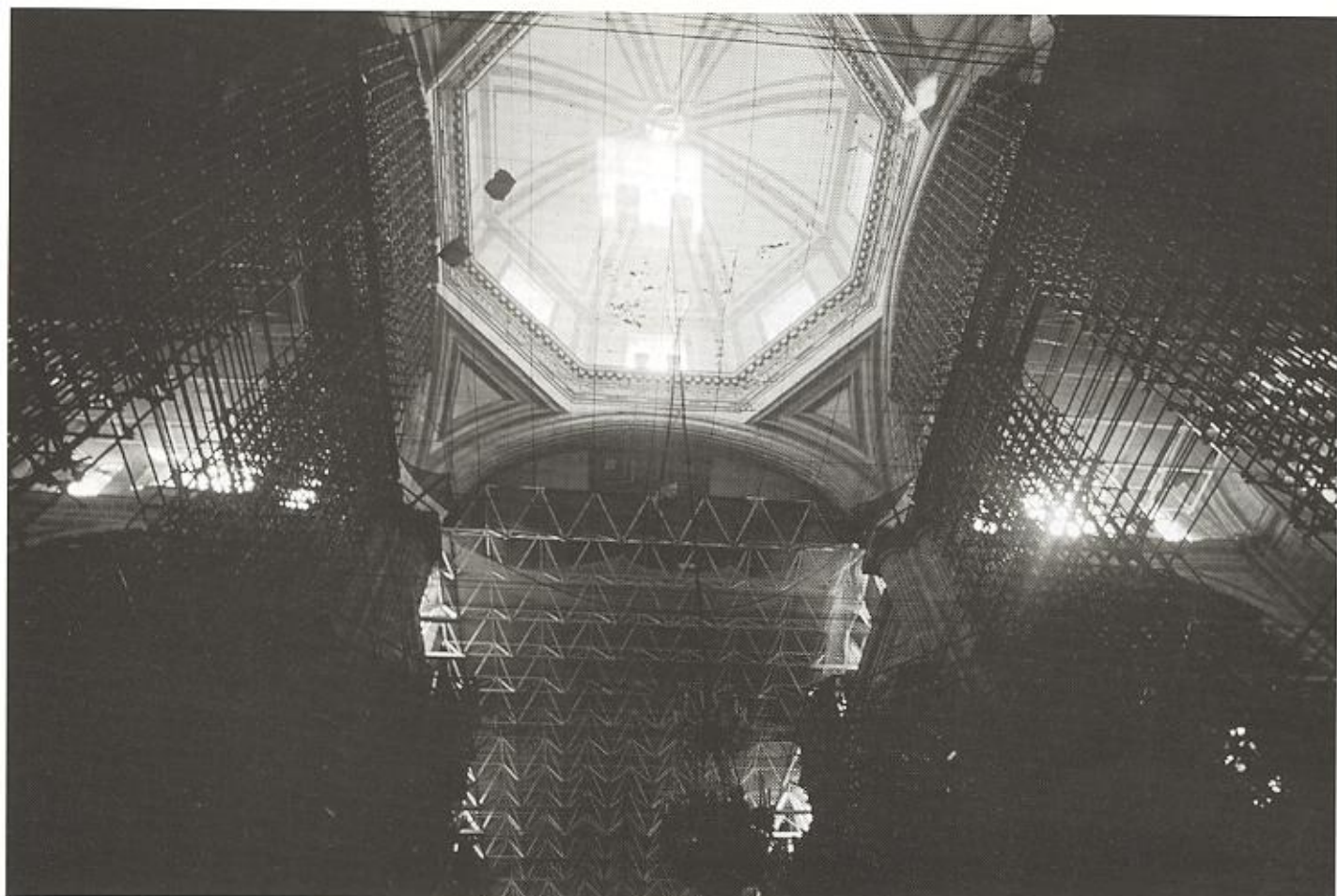


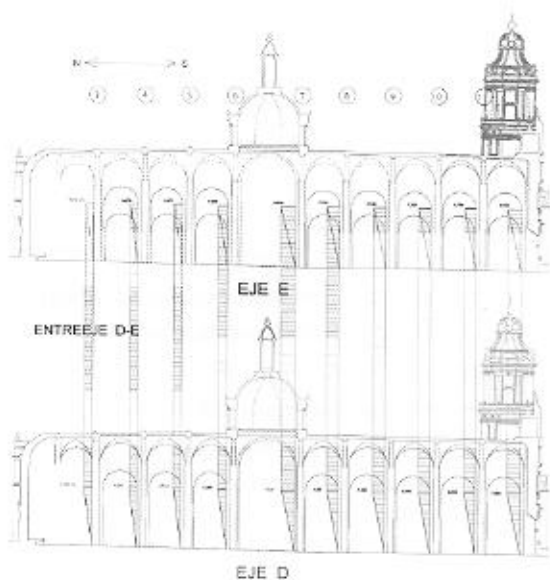
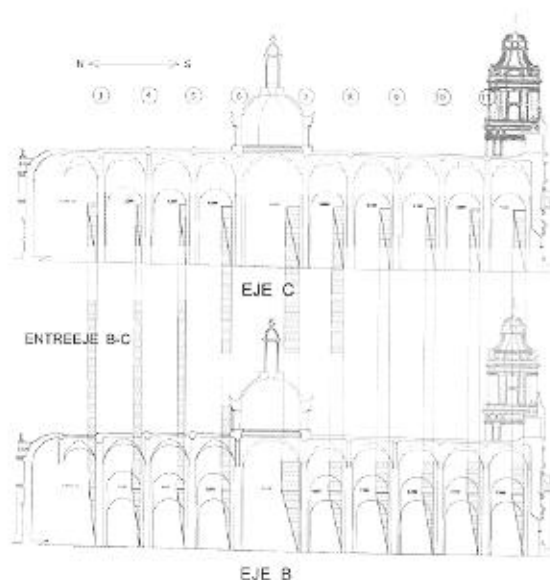
Foto: Lourdes Grobet

Del análisis en el gabinete resulta la necesidad de algunas rótulas inevitables para el mecanismo y éstas no son tan obvias y aparentes en elementos como las pilastras en contraste con las bóvedas y los muros donde son visibles y obedecen a un patrón conocido.

Son indispensables los modelos de gabinete y los métodos de campo accesibles en la etapa de aproximación a la problemática por resolver. En abril de 1996 ensayamos en la Catedral el esclerómetro, que describe la respuesta mecánica de los materiales y permite ubicar dentro de zonas caracterizadas por su condición mecánica las rótulas ocultas que complementan la condición del sistema. Posteriormente, con los datos del volumen de inyección en las juntas, verificamos los datos del esclerómetro.

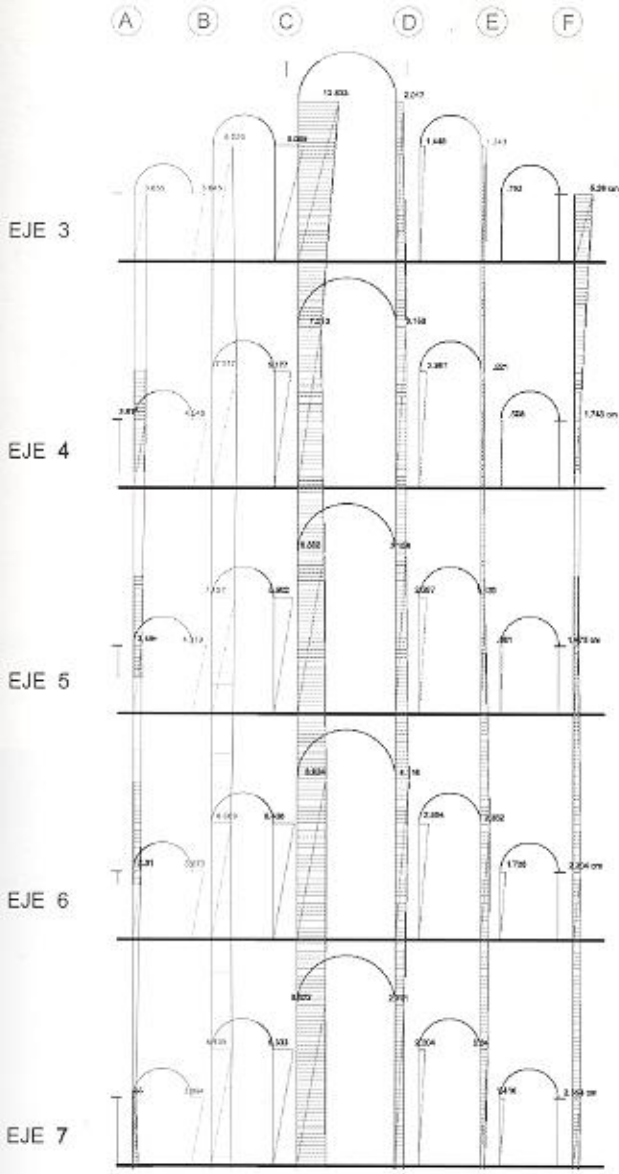
La oportunidad de observar las grietas que el proceso trataba de corregir y que también hizo visibles, ofrece patrones de conducta de interés para la etapa de aproximar la solución. Por último, el trazo geométrico de detalle describe problemas y decisiones durante el proceso de construcción, que hablan de la cultura profesional de los constructores y de sus convicciones sobre la conducta del sistema que crearon.

En el relato de la manera en que se fracturó el sistema abovedado alrededor del crucero se aprecia la acción de arco tridimensional en las bóvedas y los ángulos de descarga en los muros; en la parte correspondiente al análisis de la eficacia se ve la tendencia a alcanzar la meta en la curva que tiende a ser asintótica, lo que ya no hace razonable continuar subexcavando. Por último, los datos del esclerómetro confirman la información por los volúmenes de inyección en las juntas, lo que permite ubicar las rótulas en las pilastras con buena aproximación. Estos datos permiten orientar la búsqueda de la información en el futuro. ⊗

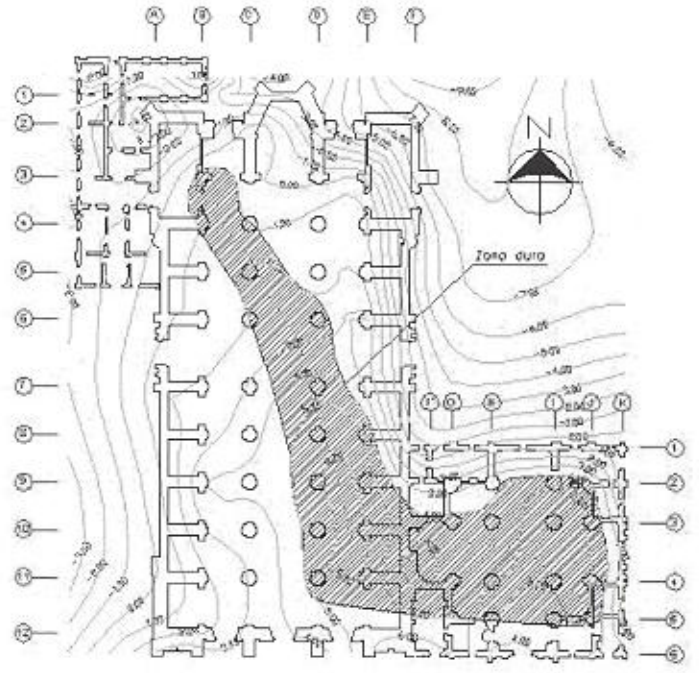


Estos diagramas ilustran la forma en que giraron las crujeas y el desplazamiento que sufrieron los elementos portantes.

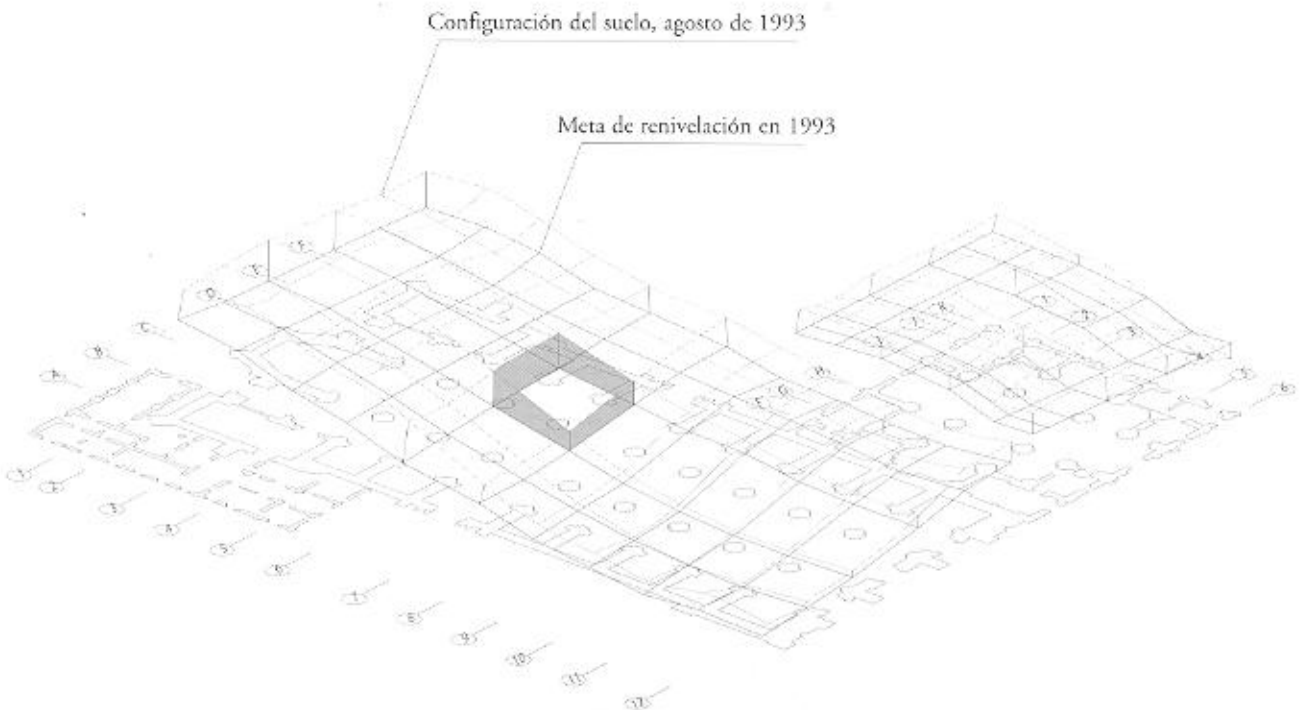
Es necesario identificar la conducta isostática en los monumentos del pasado, entender cómo actúa, analizar y cuantificar los límites tolerables del fenómeno para garantizar la seguridad de quienes los usan, sin atentar contra la postura profesional de quienes los crearon.



Análisis de la corrección geométrica alcanzada durante el proceso de subexcavación de la Catedral. El diagrama muestra la respuesta estructural en dirección transversal en cinco ejes, vistos hacia el norte. El valor de las componentes se calculó multiplicando el porcentaje de la componente del desplomo acumulado en esta dirección por la altura del nivel de imposta respectivo.



Planta de la Catedral y el Sagrario que muestra los hundimientos diferenciales



Proyecto de subexcavación. Esta técnica tiene la virtud de modelar la superficie operando en el estrato más compresible de la serie arcillosa superior, subexcavando en forma simultánea y armónica la superficie construida para evitar la concentración de esfuerzos.