

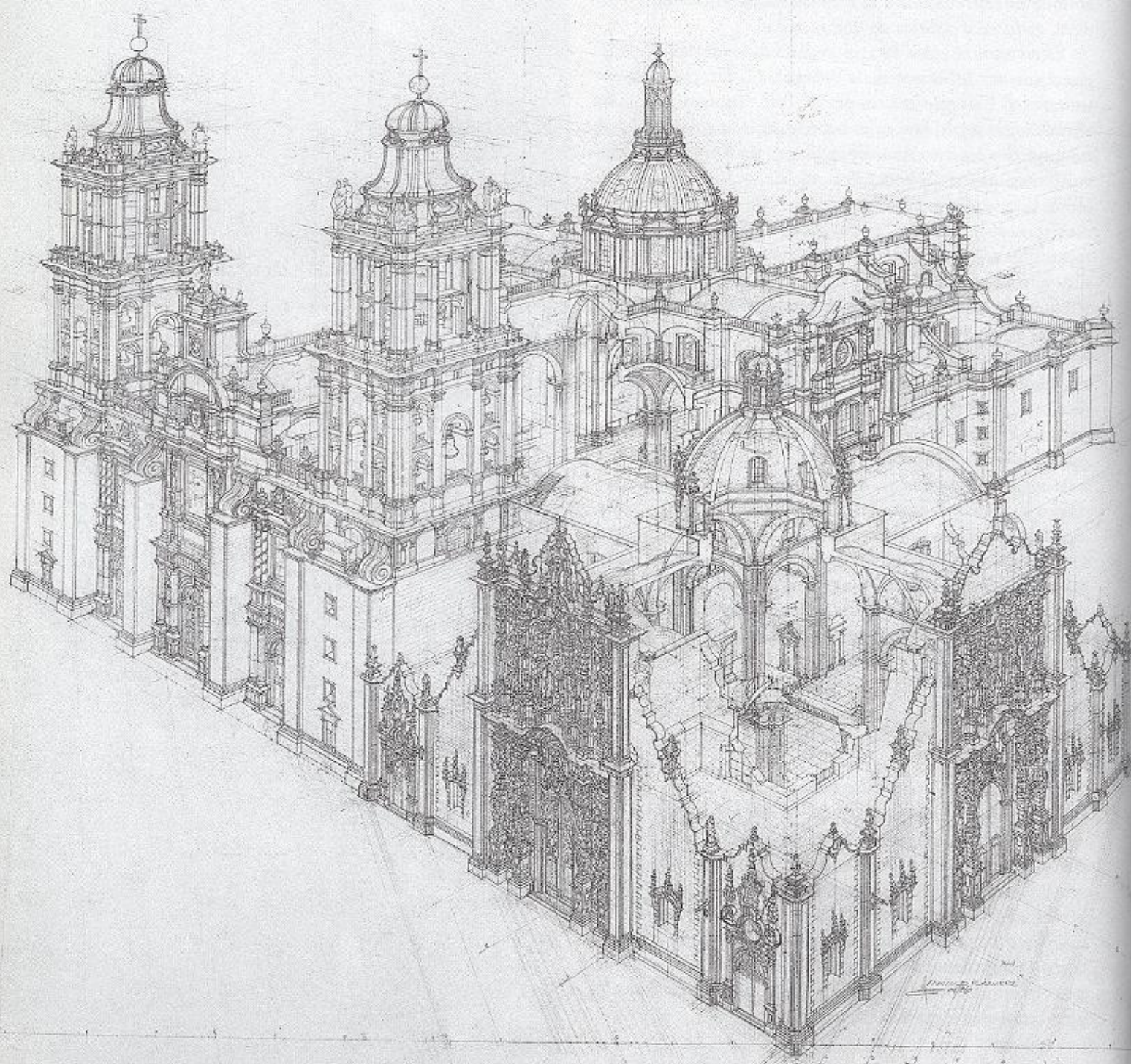
# Mejoramiento del suelo de la Catedral de México /

Fernando López Carmona y 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.

Mayolo Ramírez, Catedral y Sagrario metropolitanos, perspectiva seccionada, trazo a lápiz preparatorio cuya versión definitiva (INBA) se realizó a tinta en 1986.





Presentamos los resultados de la estabilización del suelo en la Catedral y el Sagrario Metropolitanos, trabajo que forma parte de la visión de conjunto planteada en el inicio de la intervención organizada de acuerdo con los esquemas que resolvieron el partido arquitectónico y las solicitudes de estabilidad.

**D**urante el proceso de subexcavación de la Catedral y del Sagrario Metropolitanos, Fernando López Carmona expresó que el hundimiento del suelo constituía un fenómeno lento pero permanente, y que los sismos liberan usualmente la energía que el hundimiento acumula. Este planteamiento fue considerado por los ingenieros Enrique Santoyo Villa y Enrique Taméz González de TGC, y empezaron a realizar experimentos sobre la inyección de mortero en el suelo.<sup>1</sup> Para la Facultad de Arquitectura era indispensable conocer la respuesta del suelo y valorar los métodos y procedimientos para contrarrestar el ineludible proceso de deterioro; ya que entender cómo y por qué se generan los daños exigía conocer la mecánica estructural como respuesta de la fragilidad inherente del material.

#### Origen de las configuraciones

Durante el proceso correctivo, el modelo de control geométrico se realizó a partir del punto más bajo (A-12); esto permitió evaluar el movimiento del monumento en función del descenso del origen, que respondía básicamente al hundimiento regional y debía ser superado por los efectos de la subexcavación para que la acción correctiva empezara a notarse.

Bajo la premisa de tomar como referencia un punto sin influencias inducidas que permitiera conocer el efecto de las inyecciones, en función a la naturaleza del fenómeno a inhibir, se eligió el punto C-3 como base para conocer la respuesta del suelo y cuantificar las velocidades del hundimiento diferencial (fig. 1). La asignación del valor relativo 0.00 al punto identificado históricamente como el más estable es congruente con el planteamiento inicial, porque durante la etapa de mejoramiento del suelo el proyecto de inyección no contempló la zona inmediata a C-3.

#### Análisis de las configuraciones

La preocupación por ilustrar el comportamiento del suelo después de la subexcavación permitió verificar su conducta mediante curvas de nivel correspondientes a periodos definidos de tiempo, lo cual permite identificar velocidades, características de los gradientes y las zonas que acentúan el fenómeno a inhibir para derivar lo conducente en la estructura.

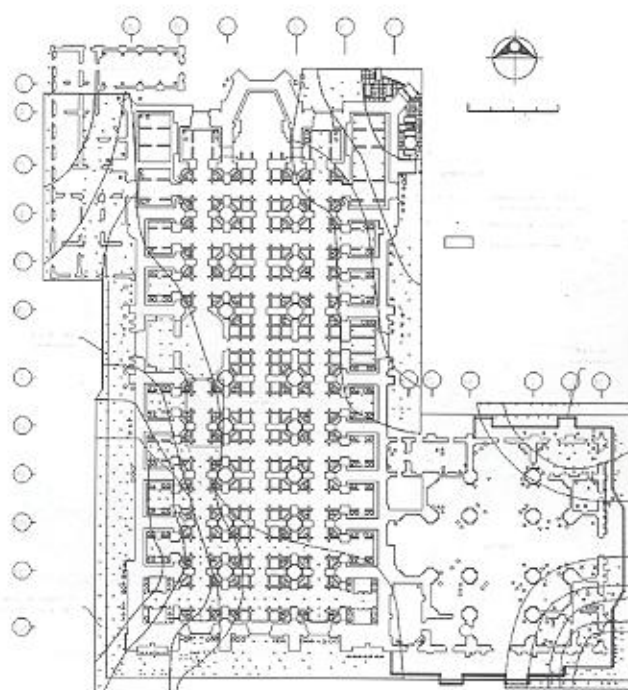


Fig.1 Primera etapa del proyecto de inyección desarrollado por TGC.

El proceso correctivo concluyó el 29 de junio de 1998, y en septiembre de ese mismo año se empezó a inyectar la zona de la torre poniente. A más de cuatro años, si establecemos periodos de doce meses mediante cuatro configuraciones, podemos conocer las variaciones que ha experimentado el suelo cada año. (fig. 2)

Año 1. Para conocer la configuración del primer año se tomó como base la nivelación NO. 172, relativa al día en que concluyó la subexcavación. El primer diferencial se calculó entre el 29 de junio de 1998 y el 28 de junio de 1999, estableciendo el nivel relativo 0.00 en el punto C-3, al cual se referirán los valores de hundimiento durante la interpretación en planta de las curvas de velocidad determinadas a partir de la interpolación de los diferenciales de cada periodo.

En la figura 2a, la densidad de curvas advierte una respuesta heterogénea del suelo e ilustra que la zona dura (identificada cuando se formuló el proyecto de subexcavación) persiste y agudiza el descenso de las zonas blandas. Al analizar el gradiente asumimos que la zona preconsolidada tiende a emerger y a abrir la estructura, porque el perímetro registra mayor

<sup>1</sup> Ver "Recuperación geométrica de la Catedral y el Sagrario Metropolitanos" en *Bitácora* 5, pags. 32-37.



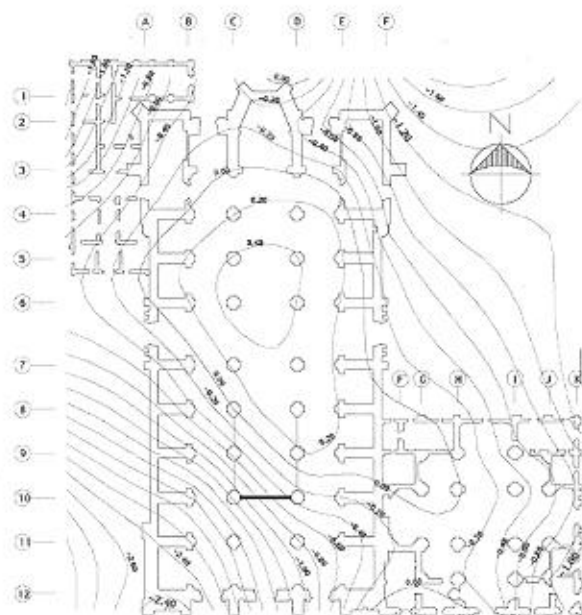


Fig. 2a. Velocidad del 29/junio/1998 al 28/junio/1999 (AÑO 1).

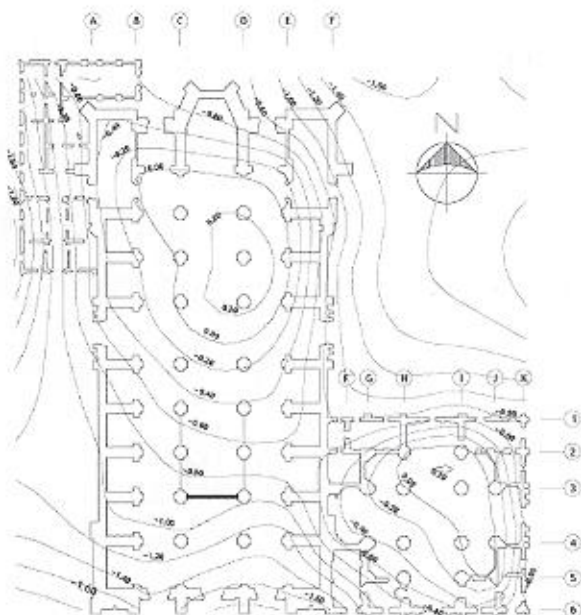


Fig. 2b. Velocidad del 28/junio/1999 al 26/junio/2000 (AÑO 2).

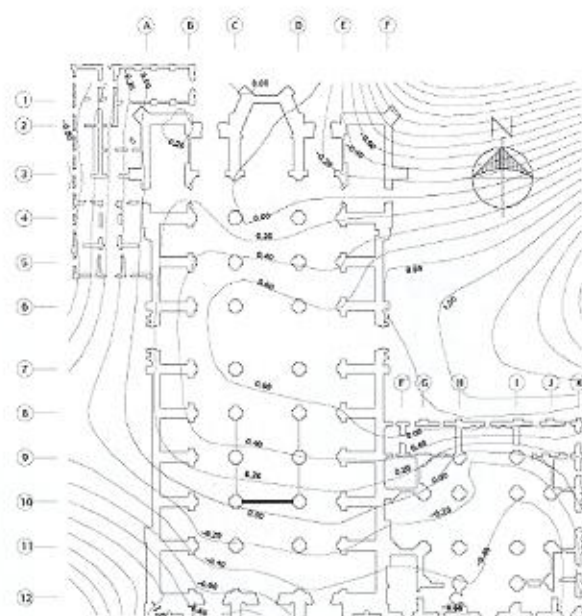


Fig. 2c. Velocidad del 26/junio/2000 al 18/junio/2001 (AÑO 3).

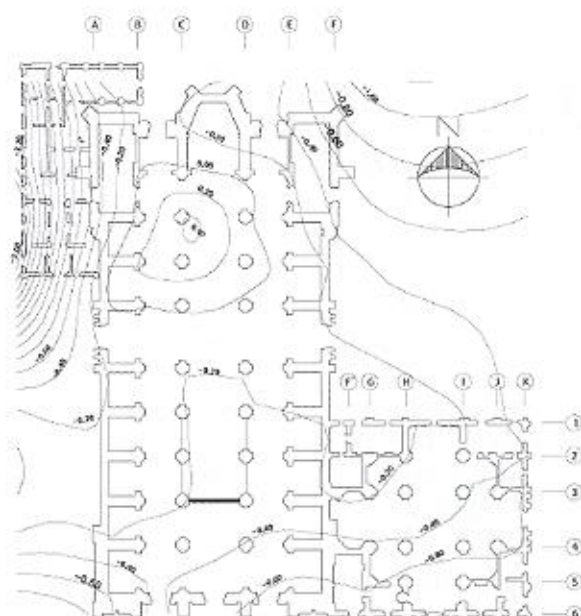


Fig. 2d. Velocidad del 18/junio/2001 al 17/junio/2002 (AÑO 4).

Fig. 2 Configuraciones relativas a las velocidades de hundimiento.

hundimiento que la zona central. Respecto a este patrón de deformación, podemos identificar los siguientes parámetros:

- Diferencia del origen a la torre poniente = 2.4 cm
- Diferencia del origen al vértice 2-F = 1.2 cm
- Diferencia del origen al vértice sureste del Sagrario = 1 cm

Año 2. (fig. 2b). La primera configuración exhibe en planta la manera como disminuyó el área de la zona dura en Catedral y como empezó a adquirir presencia en el Sagrario. Esta respuesta indica que las inserciones de mortero empezaban a estabilizar gradualmente las zonas blandas.

El diferencial a la torre poniente disminuyó a un centímetro y la trayectoria de las curvas define sólo una deformación transversal en la porción sur de la Catedral; ello indica que los efectos de las inyecciones suprimieron el giro al suroeste.

Año 3. (fig. 2c). Al analizar esta figura, que consigna el resultado del tercer periodo, se observa que la zona que inscribe los valores positivos se ha generalizado hasta el Sagrario, y que el punto duro que inicialmente coincidía en C-3 se desplazó al sur, donde se acentuaba la compresibilidad. Esta señal indica que la respuesta tiende a ser uniforme y empieza a configurar una zona de igual hundimiento en la fachada sur del conjunto.

Año 4. (fig. 2d). En esta configuración se aprecia que el número de curvas ha disminuido notablemente y que el efecto de las inyecciones está próximo a unificar la respuesta del suelo. Por ejemplo, ahora la diferencia del ábside a la torre poniente disminuyó 75% (de 2.4 cm pasó a 0.60 cm) y la fachada sur baja como cuerpo rígido. Asimismo, la tendencia inicial ha empezado a invertirse y la propensión a abrir la estructura desapareció. Las pocas curvas de velocidad indican que el movimiento diferencial del suelo disminuyó en ambos edificios. Sin embargo, la única zona que acusa inestabilidad corresponde al Museo, pues apenas en enero del 2002 se terminó de inyectar y este periodo de análisis se cerró en junio del mismo año.

Este reporte sobre el comportamiento del suelo acredita la inyección de mortero como una tecnología confiable y accesible, de calidad aditiva, con resultados graduales, capaz de inhibir los hundimientos diferenciales que vulneran las construcciones del centro histórico, sin alterar su integridad ni su condición de respuesta original.

#### Análisis de los perfiles

Durante el proceso de subexcavación, la forma de trabajo sugirió graficar los perfiles del suelo que definían a nivel de plintos las nivelaciones topográficas quincenales, de acuerdo



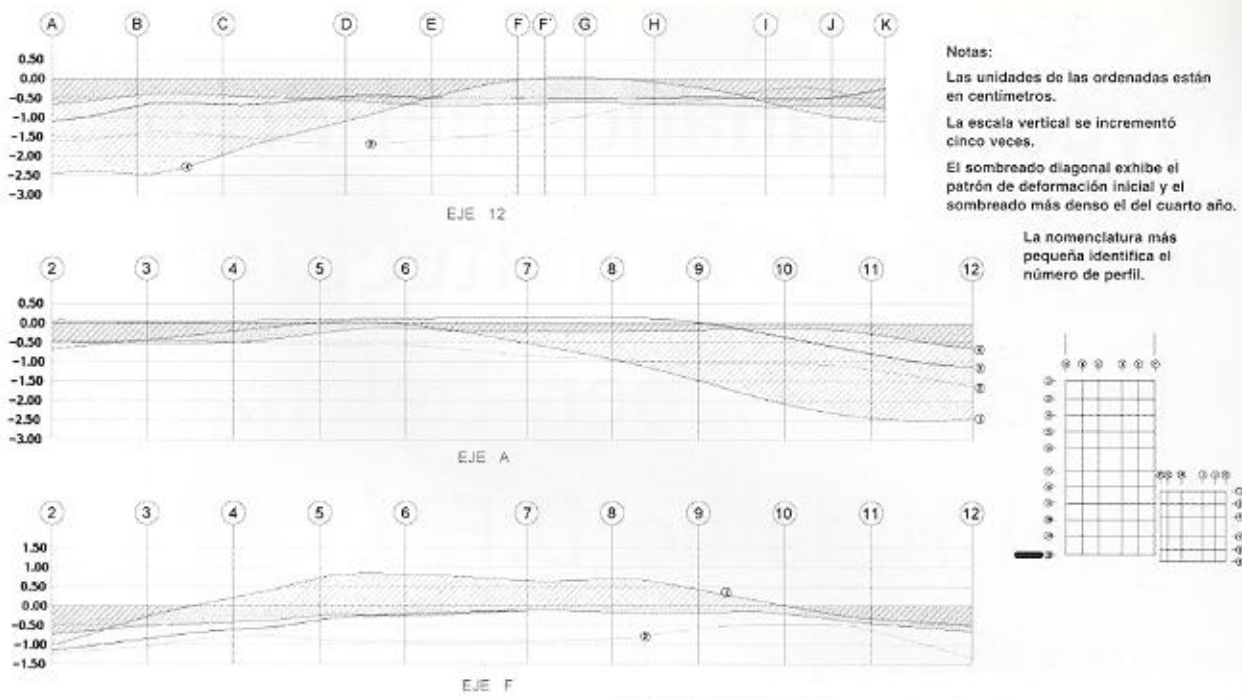


Fig.3 Perfiles del suelo.

con los ejes que rigen la respuesta estructural, con el fin de valorar las acciones inmediatas a seguir.

Estos perfiles están inscritos en una retícula de líneas verticales que corresponden a los ejes de la estructura y en una serie de líneas horizontales cada 0.5 cm, que permiten cuantificar el hundimiento de todos y cada uno de los puntos en función a la referencia 0.00. En su extremo izquierdo está consignado el valor de las ordenadas, cada uno alineado a su respectiva línea horizontal, la cual permite valorar de manera rápida los movimientos en todo el desarrollo del corte (fig. 3).

Los perfiles que ilustran la respuesta periódica del suelo se leen en función de su separación de la línea horizontal correspondiente a la elevación 0.00. Esta referencia indica que cuando el perfil se aleja advierte inestabilidad. Por aspectos de edición de la serie de perfiles transversales y longitudinales que permiten conocer la conducta del área construida, solamente describiremos los tres cortes más representativos.

Eje 12. Por su ubicación, es posible ilustrar en alzado el comportamiento que experimenta una zona preconsolidada y una zona virgen, localizadas al sur, mediante cuatro perfiles del suelo vistos hacia el norte, que incluyen a la Catedral y al Sagrario. El perfil correspondiente al primer año advierte una depresión en la zona poniente e identifica una emersión entre los ejes E-I. Hacia el año dos y tres, este patrón de deformación se va suavizando, hasta disminuir gradualmente la desigual compresibilidad del suelo y quedar casi paralelo a la línea horizontal de referencia.

Eje A. En este corte, visto al oriente, se puede observar un giro inicial hacia el sur, a partir del eje 6, e ilustra una notable recuperación de la zona compresible durante el cuarto periodo; asimismo, se deriva que la velocidad de hundimiento tiende a ser la misma en toda la fachada poniente.

Respecto a la zona norte, ésta se ha mantenido prácticamente estática; su comportamiento ilustra la capacidad técnica de TGC, relativa al mejoramiento del suelo mediante inyecciones de mortero por el método de manguitos, ya que la clara distinción que había entre zonas duras y blandas ha desaparecido.

Eje F. Los resultados de este corte muestran un claro ejemplo de homogeneización. El perfil que grafica la respuesta del primer año acusa que la zona central emergía respecto al perímetro; ahora la configuración en alzado del cuarto año exhibe una recuperación de los extremos, los cuales han alcanzado a las zonas duras, logrando que todo el

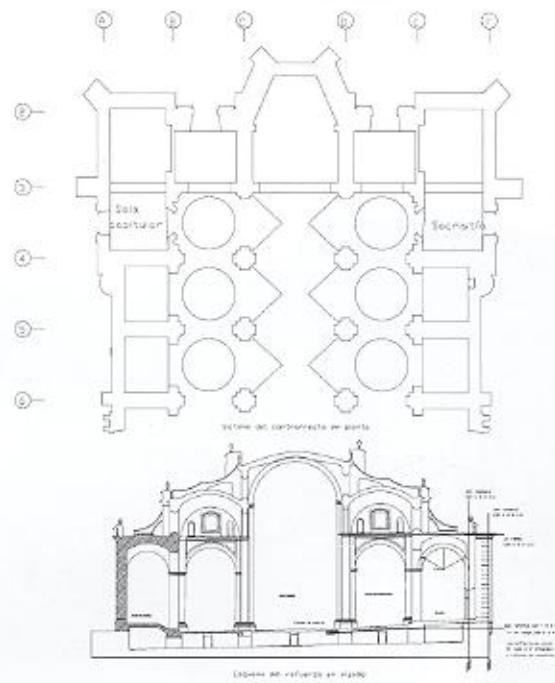


Fig.4 Esquema del sistema de rigidización para la zona norte.

perfil descienda casi de manera equidistante y los movimientos irregulares residuales que aparecen sean insignificantes a la escala del problema.

De acuerdo con los resultados, es notable que durante el primer año el suelo acusaba una inestabilidad significativa y en los consecutivos empezó a mostrar una franca recuperación gradual, congruente con el objetivo de las inserciones de mortero, las cuales han logrado cambiar el patrón de deformación inicial en dirección e intensidad y configurar perfiles equidistantes a la referencia que indica estabilidad.

Durante este proceso de diagnóstico, la observación directa del edificio condujo a analizar simultáneamente puntos neurálgicos como el 2-F, que registró una respuesta baja durante esta fase, tal como se ilustra en el presente modelo de análisis, cuya advertencia en planta y alzado permitió confirmar la necesidad de plantear un sistema de rigidización en la zona de la Sacristía.

No obstante, el trazo de Claudio de Arciniega contemplaba cuatro torres, y el suprimir durante el proceso de construcción las dos del norte exige ahora restituir las esquinas del cinturón de restricciones, reforzando verticalmente los contrafuertes y aprovechando la masividad estructural para generar su propio sistema de anclaje (fig 4). ☒