

# **la geotecnia en los monumentos históricos**

oliveira pinto, márcia orlanda

# **problemas, soluciones y teoría del arte invisible**

julio2008

*"Man is a credulous animal, and must believe something; in the absence of good grounds for belief, he will be satisfied with bad ones."*

Bertrand Russell, en Outline of Intellectual Rubbish, Unpopular Essays (1950)

*dedicado à minha família: Alcino, Idalina e Tiago*

# contenido

número	título	página
<b>1</b>	<b>introducción</b>	<b>1</b>
1.1	antecedentes	2
1.2	objetivos	3
1.3	alcances	4
<b>2</b>	<b>problemas geotécnicos y de cimentaciones</b>	<b>6</b>
2.1	consideraciones iniciales	7
2.2	errores de origen	7
2.3	cambios durante la vida del edificio	10
2.4	efectos sísmicos	12
2.5	condiciones geotécnicas en el sitio	15
2.6	secado del suelo	18
2.7	extracción de agua de la masa de suelo	21
2.8	aumento de los contenidos de agua o de humedad en la masa de suelo	23
2.9	presencia de estructuras vecinas	25
2.10	discontinuidades inducidas	28
2.11	comentarios finales	30
<b>3</b>	<b>soluciones geotécnicas</b>	<b>32</b>
3.1	consideraciones iniciales	33
3.2	rehabilitación de los elementos originales de cimentación	33
3.3	lastre	35
3.4	subexcavación	37
3.5	adición de elementos de cimentación profunda	39
3.5.1	micropilotes	39
3.5.2	pilotes de control	42
3.5.3	pilotes con control mecánico y/o funda	44
3.6	bombeo de agua en sitios selectos	46
3.7	inyección local de agua	48
3.8	electro-osmosis	50
3.9	aislamiento o separación por trincheras	51
3.10	mejoramiento del suelo	54
3.10.1	jet-grout y deep-mixing	54
3.10.2	congelamiento del suelo	56
3.10.3	inyección de morteros por fracturamiento hidráulico en suelos blandos	57
3.11	inclusiones rígidas	59
3.12	comentarios finales	62
<b>4</b>	<b>casos historia</b>	<b>66</b>
4.1	consideraciones iniciales	67
4.2	ciudad de méxico, méxico	67
4.2.1	catedral metropolitana y el sagrario	69
4.2.2	capilla de las ánimas	75
4.2.3	antiguo templo de san agustín	79
4.2.4	casa de los azulejos	84
4.2.5	antiguo templo de corpus christi	86

número	título	página
4.3	venecia, italia	89
4.3.1	basílica de san marcos	90
4.3.2	campanario de san marcos	92
4.4	torre de pisa, pisa, italia	95
4.5	muro romano, hertogenbosch, holanda	102
4.6	templo bayon de angkor thom, camboya	105
4.7	big ben, londres, inglaterra	109
4.8	sant chad, wybunbury, inglaterra	112
4.9	comentarios finales	114
<b>5</b>	<b>teoría del arte invisible</b>	<b>115</b>
5.1	consideraciones iniciales	116
5.2	la geotecnia y la restauración de monumentos	116
5.3	postulados de la teoría del arte invisible	119
	postulado 1 – investigación y recopilación	120
	postulado 2 – análisis y desarrollo	121
	postulado 3 – programa y política	121
	postulado 4 – intervención y práctica	122
	postulado 5 – monitoreo y revisión	123
5.4	comentarios finales	126
<b>6</b>	<b>conclusión</b>	<b>127</b>
6.1	conclusiones	128
6.2	recomendaciones	129
6.3	reflexiones finales	130
<b>7</b>	<b>anexos</b>	<b>131</b>
7.1	reseña de las principales teorías de restauración	132
7.1.1	la forma prístina	132
7.1.2	lo autentico	133
7.1.3	la restauración científica	135
7.1.4	el valor del monumento	135
7.1.5	la restauración crítica	137
7.2	reflexión sobre las teorías de restauración y la geotecnia	138
<b>8</b>	<b>fuentes</b>	<b>141</b>
8.1	bibliografía	142
8.2	e-book	149
8.3	online	150
<b>9</b>	<b>créditos</b>	<b>151</b>
9.1	figuras	152
9.2	tablas	158
9.3	agradecimientos	159

## prefacio

Las líneas que siguen abren las puertas hacia el maravilloso arte de las cimentaciones, escondidas bajo la construcción humana monumental. El binomio suelo-cimentación ha existido desde siempre; aun cuando la superestructura era muy sencilla, su apoyo siempre fue de suma importancia porque le daba estabilidad frente a la naturaleza, ya sea para enfrentar las adversidades o para solamente demandar su sustentáculo.

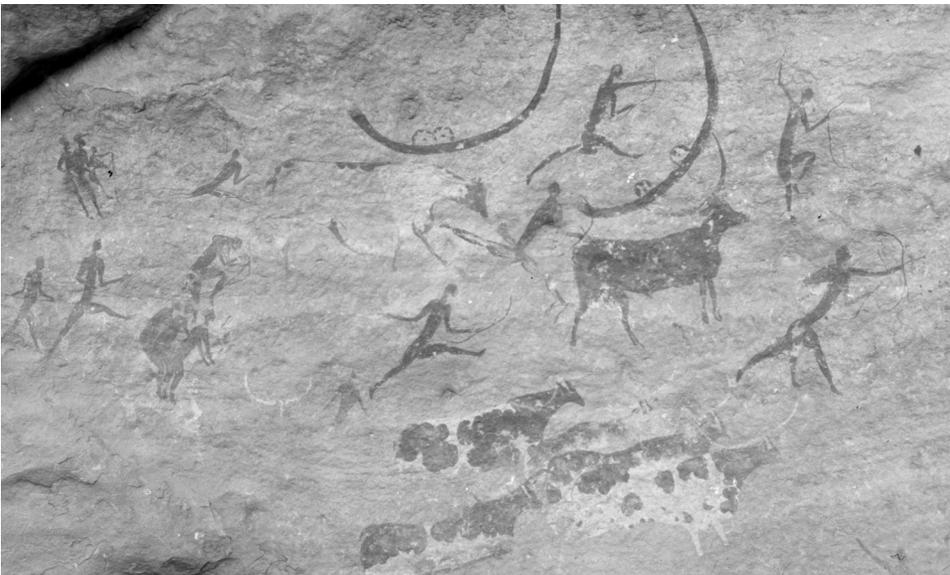
Día con día, la preocupación por el patrimonio edificado es mayor; los apasionados somos muchos; y los antiguos gremios de restauración de monumentos se empiezan a dismantelar, dando lugar a las generaciones venideras.

A los expertos se les ofrece el florilegio de material reunido durante años por varios expertos en restauración de monumentos, con la finalidad de que usen y abusen de ello, y ¡que sea un argumento para reflexionar!

A su vez, los principiantes en el campo de la restauración y conservación de monumentos se intrincarán más en el tema de la geotecnia aplicada a la herencia construida por nuestros antepasados, y ¡que sea un estímulo para la práctica futura!

Buen viaje al arte invisible ¡que es la geotecnia!

# introducción



La pintura rupestre es una de las manifestaciones artísticas más antiguas de las que se tiene constancia, con testigos que alcanzan los 40,000 años de antigüedad. En esos tiempos remotos se consideraba al arte como la pericia y habilidad en la producción de algo, tal como, actualmente, se puede considerar a la geotecnia aplicada a la restauración de monumentos.

**Figura 1.1. Caza de búfalos, Tassili n' Ajjer, Sáhara, Argelia.**

## 1.1. antecedentes

Monumento es toda obra arquitectónica con valor artístico, histórico o social. El término deriva del latín *monumentum* que significa “recordar”, por ello se aplicaba solamente a la estructura que se erigía en memoria de un personaje histórico o de un acontecimiento relevante. Más tarde, el significado empezó a comprender cualquier construcción histórica inserta en un núcleo urbano o aislada en el medio rural. Actualmente, con base en la regulación internacional, se usan los términos Patrimonio Histórico-Artístico y Bienes de Interés Cultural, que pueden ser de tipo artístico, paleontológico, arqueológico, documental, bibliográfico, científico o técnico.

La conservación de monumentos históricos es la salvaguarda de un recurso económico prácticamente no renovable. La arquitectura es el arte de proyectar y construir los edificios; a la vez, un edificio arquitectónico se diseña en beneficio de la calidad de vida y mejora ambiental del contexto en que se encuentra (barrio, ciudad o región). Vitruvio, escritor, arquitecto e ingeniero romano, en su escrito *De Architectura* enuncia los principios que deben reglamentar esa disciplina:

*“La arquitectura depende del Orden, Arreglo, Ritmo, Simetría, Propiedad, y Economía.”*

Vitruvius (EBook #20239)

En el mismo libro advierte para el papel fundamental que poseen las cimentaciones en la construcción humana:

*“Todas estas (formas de construcción humana) deben ser construidas con debida referencia a la durabilidad, utilidad y belleza. La durabilidad será asegurada cuando las cimentaciones son realizadas bajo la superficie del suelo y los materiales son seleccionados con lucidez y libertad (...).”*

Vitruvius (EBook #20239)

A la postre, escribe sobre cómo el subsuelo puede condicionar a la arquitectura, o más precisamente al entorno de una obra arquitectónica:

*“Los muros de cimentación serán una cuestión más sencilla si ellos se ubican en una ladera; pero si aquellos son colocados en una planicie o en un lugar pantanoso, su solidez debe ser previamente asegurada (...).”*

Vitruvius (EBook #20239)

A su vez, los centros históricos se identifican por sus edificios, calles y demás espacios que atestiguan los sucesos de una nación, y que forman parte de los planes de ordenamiento y planeación de las ciudades.

La desaparición de estos múltiples espacios, o de aquellos múltiples elementos que los conforman, sería un drama con costos incalculables. Esta preocupación por el estado del patrimonio y por su conservación data solamente de mediados del siglo XIX, sin embargo

actualmente tenemos la plena conciencia de que los monumentos son bienes a proteger y sus valores perdidos, bienes a recuperar.

Desde siempre la construcción humana, los problemas que la van afectando, y las soluciones para mantenerla viva, han captado el interés no sólo de muchos artistas, como también del pueblo que las heredó. Por ejemplo, en la Grecia antigua, los sismos que destruyen todo lo que encuentran en la superficie terrestre, eran fuente de inspiración para los escritores. Ellos creían que Poseidón, dios de los suelos y rocas, podía hacer la tierra temblar y fragmentarse en suelo; pero también razonaban sobre los avisos que daban el comportamiento de los animales especialmente aptos para sentir los temblores de tierra. La primera solución antisísmica fue inventada por los griegos: una “alfombra” anti-vibración colocada bajo los edificios y uniones entre la mampostería para evitar que las juntas se abrieran. Pero fueron los chinos los que más se dedicaron a la ingeniería sísmica; en el 1103 d.C. se escribe el Código Sung que imponía el uso de madera, principalmente cedro por su mayor resistencia a tensión, en las techumbres aumentando su flexibilidad y absorción de vibraciones (Kerisel, 1987). Así, todo en la arquitectura china demuestra un diseño adaptado a ciertos criterios funcionales, y lo prueban muchos de los edificios construidos en ese entonces que todavía existen.

En las Américas, por ejemplo, los Aztecas decidieron construir la capital Tenochtitlan en una laguna no muy profunda, pero sobre una arcilla lacustre con 10 veces más agua que partículas sólidas. Con la mudanza de la población hacia esa zona central, se fue formando una isla artificial, la Isla de los Perros, en donde se erigió el Templo Mayor. En ese entonces no tenían conocimiento de las técnicas de precarga del suelo, pero aún así hacían pausas durante la construcción. Posteriormente, los mexicas vieron su templo hundirse 12 m en total; actualmente, los mexicanos siguen padeciendo el hundimiento generalizado de la ciudad, especialmente en la zona del antiguo lago, debido a la sobreexplotación de agua para su suministro desde capas permeables profundas.

Un caso similar es Venecia, la ciudad sobre el agua, y sobre un suelo que se comporta casi como arena movediza. Actualmente, el nivel del agua está subiendo a una velocidad aproximada de 1 mm al año por lo que los edificios históricos sufren tanto con el agua contaminada, como con los asentamientos de los principales estratos de limo bajo el peso de las construcciones venecianas.

## 1.2. objetivos

Como México y Venecia, existen por todo el mundo monumentos en riesgo que necesitan intervención geotécnica urgente, ya que en la mayoría de los casos el problema que los amenaza reside bajo la edificación. El presente escrito advierte e informa de esas varias amenazas que el subsuelo a cada segundo ejerce sobre la superestructura.

En consecuencia, se presentan varias soluciones que se han aplicado en monumentos históricos y que han mostrado eficacia y eficiencia en muchos casos, así como otras que todavía se encuentran en etapa de experimentación, por lo que constituyen valiosa información didáctica para casos futuros.

Como apoyo a estos dos temas, los casos historia que se describen ejemplifican y comprueban, por un lado la importancia de la geotecnia en la práctica de restauración y conservación de monumentos, y por otro la posibilidad de traslado de lo aprendido a otros casos prácticos en el mundo.

Asimismo, esta es una compilación de una parte sustancial del conocimiento adquirido a lo largo de los años en el campo de la ingeniería geotécnica aplicada a la restauración de monumentos; finalmente, la “cúpula” y gran objetivo de este trabajo son las recomendaciones para ingenieros geotécnicos dedicados a la labor de restauración de monumentos históricos. Por lo demás, se espera que cualquiera que lea las líneas que constituyen esta tesis cree conciencia sobre la importancia del testigo invisible que toda obra humana monumental posee.

### 1.3. alcances

En el capítulo segundo, Problemas Geotécnicos y de Cimentaciones, se abordarán los principales problemas que afectan a las construcciones en general, si bien aquí nos enfocaremos en las afectaciones a las estructuras con valor histórico; en la mayoría de los casos esos problemas resultan en asentamientos y en complicaciones de capacidad de carga. Los factores más importantes van desde fenómenos naturales como los efectos de los sismos o las condiciones geotécnicas sobre las construcciones, hasta los problemas inducidos por el Hombre, como los cambios estructurales durante la vida del monumento, la presencia de estructuras vecinas o las discontinuidades inducidas en el subsuelo, pasando por problemas que muchas veces no son estudiados, o de los cuales no es tan clara la afectación en el edificio, como los errores de origen, el secado del suelo, la extracción de agua de la masa de suelo, el aumento del contenido de agua o humedad en la masa de suelo. Aparte de los fenómenos naturales, todos los demás problemas son muchas veces evitables, es decir, se pueden solucionar cuando recién empiezan a afectar el monumento y muchas veces se pueden detener para que no sigan destruyendo el patrimonio edificado. También hay que tener presente que muchos de los problemas mencionados pueden actuar en concomitancia volviéndose peligrosamente destructivos, lo que puede implicar el uso de varias soluciones a la vez.

Dichas soluciones, en caso de que la intervención directa sobre el edificio sea la última hipótesis para su sobrevivencia, se presentan en el capítulo tercero, Soluciones Geotécnicas. Ellas se pueden clasificar como preventivas o correctivas, según se quiera prevenir o corregir la afectación al monumento, y como temporales o permanentes, según su carácter o lo previsto en el proyecto. También se pueden considerar como obstructoras o no, según impidan el funcionamiento del edificio durante la intervención, o porque provoquen daños o cambios irreversibles en las estructuras enterradas o en la superestructura. Las medidas que más respetan un monumento son: la habilitación de los elementos originales de la cimentación, exceptuando los casos en que se tendrá que destruir parte de la cimentación; el lastre, a pesar de que estéticamente afecta sobremanera al monumento; la subexcavación, medida que se usó en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México y en la Torre de Pisa; la inyección local de agua, muchas veces complementaria del bombeo de agua en sitios selectos; la electro-osmosis, con muchas desventajas a nivel de funcionamiento, y por ello cada vez más en desuso; el aislamiento o

separación por trincheras, para que el monumento funcione independientemente de las estructuras vecinas, ya sean enterradas o superficiales; el mejoramiento del suelo, por medio del Jet-Grouting y Deep-Mixing, del congelamiento del suelo, o de la inyección de morteros por fracturamiento hidráulico. Las medidas más obstructoras y menos respetuosas de los monumentos son: la adicción de elementos de cimentación profunda, como los micropilotes, los pilotes de control, y los pilotes con control mecánico y/o funda, las cuales son permanentes e implican la destrucción tanto de la superestructura como de las cimentaciones existentes; las inclusiones rígidas, a pesar de que fueron usadas en la construcción de muchos edificios antiguos (cuando se usan para recimentación, o mejoría de las condiciones geotécnicas bajo el edificio, implican la destrucción del patrimonio enterrado, así como de la estructura que sobre él se asienta).

En el capítulo cuarto, Casos Historia, se discuten los ejemplos que apoyan y ejemplifican los dos capítulos que le anteceden. La conservación de las ciudades y monumentos históricos es uno de los problemas que más desafían a la moderna civilización, ya que envuelve un número de diferentes factores, por lo tanto es indispensable un método interdisciplinario entre tantos y tan diferentes estudiosos. En lo que respecta a la ingeniería, el concepto de integridad del monumento es de alguna forma difícil de evaluar cuando comparado con la seguridad y servicio a la comunidad. Los ingenieros geotécnicos enfrentan una labor y una secuencia de decisiones bastante más complejas que las de los demás expertos en monumentos históricos, por el carácter invisible de las cimentaciones; asimismo, es importante entender y conocer los casos en los que la ingeniería geotécnica es fundamental y muchas veces tiene que sacrificar el testigo escondido bajo el monumento con el fin de preservar la superestructura. Cada caso presentado en este escrito posee alguna particularidad que lo hace didáctico para cualquier ingeniero o especialista dedicado a la restauración de monumentos históricos.

En el capítulo quinto, Teoría del Arte Invisible, se presentan los postulados de una teoría de rehabilitación del arte concerniente a los geotécnicos. La evolución de la disciplina de restauración de monumentos tiene en cuenta aspectos técnicos, ideológicos, económicos y jurídicos. A su vez, la labor practicada en los monumentos históricos es algo complicada debido a las diversas intervenciones que una obra ha podido sufrir a lo largo de su existencia, a la cantidad interminable de materiales y procedimientos superpuestos y pertenecientes a diversas épocas, y a la evaluación, o decisión, de lo que se debe preservar, restaurar o destruir. Por lo demás, muchos restauradores ya poseen pautas o directrices en las que basan su práctica profesional; por el contrario, los ingenieros, y aun más los geotécnicos, intervienen en un monumento como les dicta el sentimiento. Por esto, la propuesta de los postulados de la teoría geotécnica aplicada a la restauración de monumentos constituye la cima de este escrito.

## problemas geotécnicos y de cimentaciones



El Dur-Untash es uno de los zigurates mejor conservados; fue construido en el siglo XIII a.C. en la antigua Mesopotamia. Ahí los terrenos para construcción eran suelos aluviales blandos bastante hostiles, por lo que los sumerios, babilonios y asirios, erigieron sus templos sobre gigantescos y masivos pedraplenes.

**Figura 2.1. Dur-Untash, o Choqa Zanbil, ubicado en Susa, Irán.**

## 2.1. consideraciones iniciales

Actualmente, el patrimonio edificado sufre la consecuencia de la mano del Hombre, del uso inadecuado, del vandalismo y la precariedad, así como de los fenómenos naturales, los cuales pueden dar lugar a deformaciones excesivas, inestabilidad u otros problemas originados en el subsuelo. Estos últimos se refieren a los problemas geotécnicos y de cimentaciones, motivados por múltiples y variados factores, que cuando conocidos, aportan la clave para la solución de aquellos.

Unos de los mayores problemas que afectan a las construcciones antiguas son los asentamientos, principalmente los diferenciales los cuales promueven inclinaciones y eventualmente la aparición de daños en la estructura; también perturban a las estructuras vecinas e infraestructuras urbanas, además de que incrementan la vulnerabilidad a las catástrofes ambientales. Dichos asentamientos dependen, en gran parte, de las condiciones del subsuelo en el sitio, así como del arreglo estructural y geométrico de la edificación, o de los materiales y técnicas de construcción.

Los problemas de capacidad de carga en monumentos antiguos también son importantes; en la mayoría de los casos, ocurren cuando cambian las condiciones geotécnicas predominantes *in situ*. Los agentes naturales, como las lluvias torrenciales, inundaciones o sismos, pueden reducir la resistencia al esfuerzo cortante o incrementar los esfuerzos aplicados, conduciendo a una falla por capacidad de carga. A la par, los cambios del contenido de agua dentro de la masa de suelo, la realización de excavaciones y construcción de edificios o túneles en las cercanías del monumento, son factores generalmente inducidos por el Hombre y que también pueden conducir a problemas de capacidad de carga.

En este capítulo se dan a conocer los principales problemas que afectan a las estructuras monumentales. Con relación a cada uno de ellos, se explican los factores de influencia, y se mencionan casos reales de obras con valor histórico o cultural, las cuales se describen con más detalle en el capítulo cuarto.

## 2.2. errores de origen

Los errores de origen, de diseño y/o de construcción, constituyen uno de los acontecimientos que dan lugar a asentamientos o fallas por capacidad de carga. No es raro que empiecen a afectar a la estructura algún tiempo después del término de la construcción, pero las consecuencias pueden perdurar por grandes períodos durante la vida posterior del edificio. Por un lado, los errores de diseño suelen ser arquitectónicos, geométricos, estructurales, geotécnicos, o cualquier combinación de ellos; por otro, los errores de construcción pueden ser consecuencia de limitaciones tecnológicas durante la época de construcción como la imposibilidad en la obtención de la verticalidad o de los ángulos rectos en muros, techos, etc., así como de la alteración, o remoldeo del subsuelo a nivel de la cimentación.

Al proyectar una edificación antigua pueden ocurrir sucesos que dan lugar a fallas de diseño estructural o geotécnico. Por otro lado la insuficiencia técnica y la falta de experiencia, que se han atenuado conforme ha evolucionado la tecnología de la construcción, pueden conducir a defectos estructurales, como la irregularidad de la forma, la cantidad de refuerzo (por ejemplo, el dimensionamiento desproporcionado de la estructura), o la deficiente estimación de la capacidad de carga del suelo donde se localiza la edificación. Además, en las construcciones antiguas suelen detectarse problemas por el tamaño de los cimientos, o sea por dimensiones inferiores a las requeridas, y por conocimiento incompleto de las características del subsuelo y de las discontinuidades que puedan existir.

Los errores más comunes durante la etapa constructiva son: la baja calidad de los materiales de construcción, la deficiente o descontrolada mano de obra, y el agotamiento de recursos humanos y económicos. Estos factores pueden conducir a drenaje inadecuado de la zona de construcción, deficiencias en las conexiones entre elementos de la cimentación, o ausencia de elementos de continuidad entre la súper y la subestructura.



La Basílica de San Marcos es la obra maestra de la influencia bizantina en Venecia. Fue construida en el año de 828 para guardar el cuerpo de San Marcos. En 975 fue quemada durante un motín, y reconstruida en 1063. En el siglo XIII se le añade un nártex; en los siglos XV y XVII es nuevamente modificada. La variedad de estilos y materiales se lo debe a una ley de la República Veneciana que imponía a los mercadores afortunados un regalo al monumento siempre que hicieran negocio.

**Figura 2.2. Basílica de San Marcos, Venecia, Italia.**

La Basílica de San Marcos en Venecia (Fig. 2.2), a pesar de ser un icono y edificio de mucha inversión, es un ejemplo notorio de la baja calidad de los materiales estructurales y de la escasa calidad de la mano de obra constructiva (Gajo, Soranzo y Vitaliani, 1996). Después de haber pasado por reconstrucciones y adiciones de elementos tanto estructurales como ornamentales,

sin un refuerzo adecuado, hoy el símbolo veneciano se encuentra bastante debilitado. En la misma plaza veneciana, el cálculo erróneo de la capacidad de carga, resultó en una cimentación deficiente para el peso del edificio y creó problemas en el Campanario (Fig. 2.3) de la misma Basílica (Colombo y Colleselli, 1996).



La construcción del Campanario se inició en el siglo IX. Después de la aparición y consecuente reparación de muchas grietas, la torre se desmoronó en 1902 debido a una cimentación insuficiente.

**Figura 2.3. Caída del Campanario de San Marcos, Venecia, Italia.**

Se debe tener presente que, a lo que hoy consideramos como monumento histórico, es decir cualquier bien de interés cultural, fue construido en otra época por generaciones pasadas, quienes pretendían que la obra perdurara a lo largo de varias descendencias por la significación local y temporal que porta. Sin embargo, los sucesos naturales, y muchas veces, la inexperiencia de los diseñadores y constructores de ese entonces, hacen con que este tipo de problemas se intensifique, o manifieste, reincidentemente durante la vida del edificio. A pesar de que muchas

veces son problemas graves y sin enmienda obvio o de fácil implementación, en muchos monumentos aquellos se fueron arreglando generación tras generación; actualmente, existen estudios que permiten entender mejor dichos problemas, así como soluciones novedosas y bastante efectivas, que en muchos casos aseguran la estabilidad de la construcción por varios años.

### 2.3. cambios durante la vida del edificio

En las estructuras antiguas, los cambios en el uso primordial del edificio pueden actuar en detrimento de su estabilidad, o en casos extremos ser fatales, ya que originan modificaciones en la magnitud y distribución de cargas en la estructura. Consecuentemente, estas últimas pueden cambiar las cargas transmitidas a la cimentación y al subsuelo; esta cadena de acontecimientos puede generar problemas de capacidad de carga o de asentamientos diferenciales.



Angkor fue una antigua ciudad del imperio Jemer, entre los siglos IX y XV. Las caras sonrientes son una de las maravillas de las “ruinas” (clasificación que, con el tiempo, se va aplicando cada vez más a los templos del emporio).

**Figura 2.4. Caras sonrientes en Angkor, Camboya.**

Asimismo, es importante entender el funcionamiento estructural del edificio monumental y el mecanismo de transmisión de fuerzas. Son varios los factores que cambian estas características; por una parte, la estructura se puede dañar por acaecimientos accidentales como sismos, vientos, incendios e inundaciones (por ejemplo en sótanos), o debido al deterioro por intemperismo, agentes químicos y otros efectos ambientales; por otra, pueden ocurrir modificaciones hechas por el Hombre a lo largo de la vida del monumento, tanto en la estructura como en los materiales que la constituyen. Aquí se incluyen: adición de nuevos cuerpos en los

conjuntos monumentales, ampliación de cuerpos existentes en planta y en altura, conexiones a construcciones anteriormente independientes, sustitución de techumbres ligeras en madera por otras con peso elevado, etc., lo que conduce al aumento o disminución de la carga muerta.



La Torre de Pisa es el famoso campanario inclinado de la Catedral de Pisa. Se empezó a inclinar tan pronto como se inició su construcción, y debido a esta “deficiencia” es uno de los monumentos más visitados en el mundo.

**Figura 2.5. Torre de Pisa, Pisa, Italia.**

Ejemplo de este tipo de problemas es la ya mencionada Basílica de San Marcos (Fig. 2.2), como se describirá con más detalle en el capítulo cuarto. Recientemente, el Templo de Bayon (Fig. 2.4), en Camboya, tuvo que ser sometido a varias intervenciones de restauración porque los cambios a nivel de la superestructura, respectivamente la erección de columnas nuevas (anastilosis), indujeron cargas inesperadas a la cimentación, y por ende, una falla por capacidad de carga (Iwasaki, 2005). Algo similar, pero al nivel del suelo, sucedió en la Torre de Pisa (Fig. 2.5), ya que

se excavó el llamado *catino* en el siglo XIX, para descubrir los cimientos originales, lo que vino a cambiar sobremanera las cargas transmitidas al subsuelo (Burland, Jamiolkowski y Viggiani, 2003).

Un monumento, y en general cualquier obra arquitectónica, está constituido por muchos elementos que conforman espacios así como redes de relaciones estructurales y arquitectónicas gracias a las cuales, los edificios permanecen estables. Sin embargo, cuando se dan cambios en su uso suele ocurrir que la debilidad del edificio no se perciba “a ojo desnudo”, pero que tarde o temprano afectará al buen funcionamiento de la edificación. Además, mientras más larga es la vida de una construcción, más vulnerable está a todo tipo de fenómenos, por tanto la adecuada y atenta conservación de los edificios monumentales es imprescindible. En casos de rehabilitación se necesitan estudios previos con el fin de evaluar las condiciones de estabilidad del edificio ya que estas dictarán cual la mejor intervención y el procedimiento a seguir.

### 2.4. efectos sísmicos

Los sismos siempre han, y seguirán, causando la pérdida de vidas y la destrucción de las obras humanas. Los monumentos históricos, por lo general, fueron obras proyectadas por nuestros antepasados con la intención de dejar herencia de la cultura y del arte de los pueblos. Muchas de esas obras han sobrevivido a los terremotos gracias a su grado de dureza, a su conformación y resistencia intrínseca, al mantenimiento y conservación experimentado y a la disposición de algunos pueblos por preservar estos legados ancestrales (Lobo Quintero, 2003).

La mayoría de los monumentos son estructuras rígidas de mampostería con techos compuestos de vigas de madera, que alcanzan poca altura; consecuentemente, deberían ser menos vulnerables a los sismos. Sin embargo, las mencionadas techumbres son pesadas y por ello susceptibles de sufrir y provocar daños durante temblores intensos (Santoyo et al, 2005). Del mismo modo, los sismos, en particular las ondas superficiales, afectan las infraestructuras hidráulicas, por lo que pueden ocurrir fugas en los sistemas de distribución y drenaje, y por ende, cambiar las condiciones del subsuelo.

La vulnerabilidad sísmica de una estructura monumental depende por un lado de las características del sismo y por otro de las características dinámicas de dicha estructura. En el primer grupo se incluye la intensidad sísmica, las condiciones locales del subsuelo, la magnitud del sismo, la distancia epicentral y la naturaleza de las fuentes sísmicas, así como los efectos de sitio (Santoyo et al, 2005). A estos factores se suman las características de tipo estructural del monumento, como la adición de masas a lo largo de la vida de la construcción, los problemas concernientes a los materiales y técnicas constructivas, el estado de conservación, y los hundimientos ya ocurridos, los cuales inducen más daño estructural e inclinaciones.

En todo el mundo existen monumentos, que para su supervivencia, los constructores han adoptado soluciones de construcción sismorresistente. En varios países de Iberoamérica, como México, Guatemala, Perú o Ecuador, a partir del siglo XVI, se mezclaron las tradiciones de construcción autóctona con la arquitectura, estilos, materiales y formas europeas; los recién llegados constructores, para contrarrestar la alta sismicidad de las tierras americanas,

incorporaron a sus construcciones contrafuertes externos, muros transversales cercanos, mayor dimensión de pilares y muros, reducciones de altura y esbeltez en las torres (Lobo Quintero, 2003). No obstante, los movimientos sísmicos son más bien influenciados por los efectos de interacción entre sus cimentaciones y los estratos de suelo subyacente; es decir, las condiciones locales del suelo, o los efectos de sitio, tienen una gran influencia en la distribución de la intensidad sísmica (Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo, 2007). Por ello, los mencionados viajeros, a lo largo del tiempo fueron aprendiendo sobre las formas arquitectónicas más o menos “aptas”; por ejemplo, en Oaxaca, capital del estado mexicano con el mismo nombre, las torres son bajas (como es el caso de la Basílica de la Soledad, Fig. 2.6), por el contrario en Puebla, otra ciudad de México, aquellas son altas por lo que siguen sufriendo daños atribuibles a los temblores (un buen ejemplo es el Templo de La Compañía, Fig. 2.7).



La Basílica de Nuestra Señora de la Soledad fue construida entre 1682 y 1690. El monumento es de estilo barroco, y es característica su escasa altura. Esta estrategia constructiva, que ha prolongado mucho su vida útil, se la debe al conocimiento básico de ingeniería sismorresistente de los constructores, que asistieron a la destrucción de varios edificios importantes debido a los terremotos.

**Figura 2.6. Torres de la Basílica de la Soledad, Oaxaca, México.**

Así, el subsuelo es condicionante en el comportamiento de las estructuras ante un sismo; muchas veces se presentan asentamientos excesivos, pérdidas por capacidad de carga como ocurre en algunas arenas poco compactas, y también amplificaciones locales del movimiento del terreno, como es el caso de las arcillas de la ciudad de México. En la zona central de esta capital los períodos del sitio varían entre 1 y 3 s, aproximadamente; las estructuras más antiguas y rígidas tienen períodos de vibración natural menores, como de 0.3 a 0.5 s, por lo que no son tan vulnerables a los terremotos, con excepción de las altas torres de las iglesias que, en muchos casos, son esbeltas (Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo, 2007).



El Templo de la Compañía fue diseñado por José Miguel de Santa María, y por sus proporciones es considerado una de las mayores obras arquitectónicas poblanas del siglo XVIII. Sin embargo, las torres altas no han parado de caer debido a los sismos.

**Figura 2.7. Templo de la Compañía, Puebla, México.**

Finalmente son inmensos los casos de edificios monumentales con problemas estructurales debidos a los sismos, principalmente en zonas como Lisboa, la cual sufrió un terrible terremoto en 1755, dejando por tierra toda la ciudad; el Mosteiro dos Jerónimos (Fig. 2.8), reliquia de la arquitectura manuelina portuguesa, si bien sobrevivió a ese temblor, no resistió a otro de intensidad inferior en 1756.

Cabe recordar que, así como las estructuras acumulan daños, sus períodos naturales de vibración aumentan, hasta el punto en que se pueden hacer peligrosamente cercanos al período natural del terreno (Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo, 2007). De esta forma, es recomendable reducir la vulnerabilidad de las construcciones históricas, sin distorsionar el concepto original de aquellas, usando materiales y técnicas tradicionales, o aplicar cuidadosamente las innovaciones y técnicas actuales (Lobo Quintero, 2003). Por fin, tener presente que los edificios antiguos a pesar de que han soportado sismos, guerras y otras catástrofes, han demostrado una seguridad superior a la normal, por lo que merecen todo el respeto en la hora de intervención.



El monasterio es dedicado a la riqueza de los Descubrimientos Portugueses. La vulnerabilidad del monumento aumentó considerablemente tras el histórico terremoto de 1755, que se llegó a sentir en Londres.

**Figura 2.8. Mosteiro dos Jerónimos, Lisboa, Portugal.**

En países en donde la ocurrencia de temblores destructivos es esporádica, como es el caso de Portugal, las modificaciones en la práctica de construcción son pocas; por el contrario, en países donde ocurren sismos fuertes frecuentemente, las lecciones dadas por la destrucción se traducen directamente en modificaciones constructivas y arquitectónicas, con el fin de aumentar la resistencia de las edificaciones delante esos eventos, como por ejemplo en Oaxaca, México.

## 2.5. condiciones geotécnicas en el sitio

La estratigrafía del subsuelo, así como sus propiedades, influyen grandemente en el comportamiento de las edificaciones. Dependiendo del proceso geológico que originó el suelo, o

de la historia de cargas, los problemas de este tipo pueden ser más o menos graves. Factores como la distribución errática de compresibilidades, variaciones del espesor de estratos de suelo o estructuras enterradas, pueden generar asentamientos diferenciales importantes en las estructuras, y también problemas de capacidad portante, sobretodo cuando se trata de construcciones extensas sometidas a condiciones de carga muy diferentes.



El Palacio Nacional sufrió con varias modificaciones, remodelaciones, conflictos bélicos, incendios, y todavía sufre con el subsuelo; no obstante, su naturaleza no la violentaron: siempre fue origen y destino del poder de la ciudad de México.

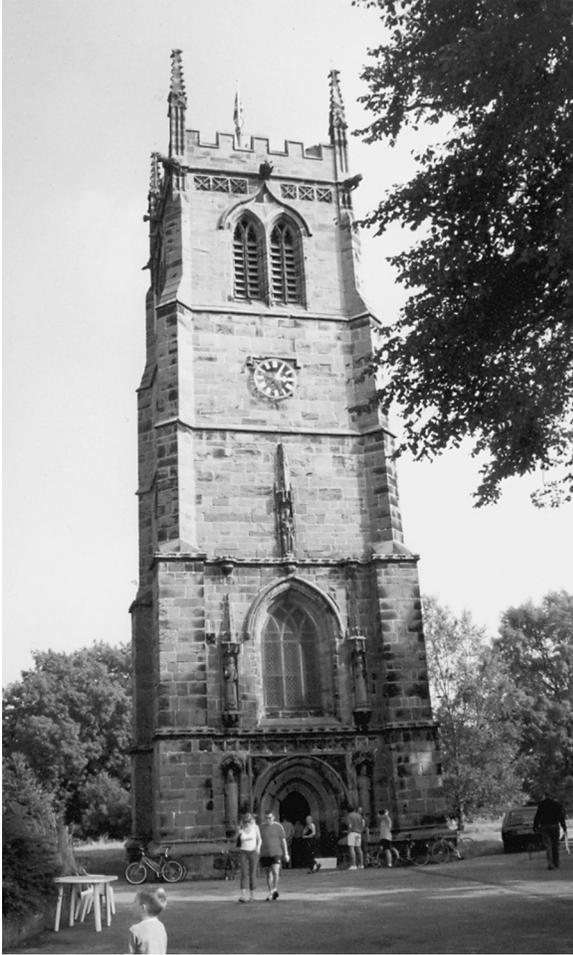
**Figura 2.9. Palacio Nacional, ciudad de México, México.**

Muchos de los edificios circundantes al zócalo de la ciudad de México se hallan afectados por las estructuras prehispánicas enterradas. Varias zonas del Palacio Nacional (Fig. 2.9), por ejemplo, se apoyan en parte de las Casas Nuevas del emperador Moctezuma. Por otro lado, la complicada historia de cargas dio lugar a una notable heterogeneidad de las propiedades mecánicas del subsuelo del centro histórico de la misma ciudad, principalmente a la de su compresibilidad (Ovando Shelley et al, 2008), causando asentamientos diferenciales preocupantes en muchos monumentos ahí desplantados, como es el caso del Templo de San Agustín (Fig. 2.10). Los hundimientos profundos de estratos débiles también pueden influir en las construcciones a la superficie, como es el caso de Sant Chad (Fig. 2.11), en Inglaterra (Johnston y Burland, 2001).



El templo original de 1587 fue consumido por un incendio en 1676; el nuevo edificio se empezó a construir en 1677. Dos siglos después se fraccionó el terreno, y fue readaptado; hoy alberga a la Biblioteca Nacional de México. La compleja historia de cargas y las discontinuidades del subsuelo han puesto en riesgo a la “algo olvidada” obra arquitectónica.

**Figura 2.10. Antigua Templo de San Agustín, ciudad de México, México.**



La torre inclinada del sur de Cheshire es todo lo que resta de la iglesia del siglo XV. El problemático suelo de la zona, no deja que sobrevivan las monumentales construcciones humanas.

**Figura 2.11. Sant Chad, Wybunbury, Inglaterra.**

Las condiciones geotécnicas del sitio son fundamentales para entender el funcionamiento de una edificación. Su determinación está al alcance de los especialistas y muchas veces es colocada en segundo plano por razones varias. Es de señalar que los eventuales problemas consecuentes de la toma de decisiones equivocadas a raíz de un estudio geotécnico pobre, incompleto o deficiente, son graves, pero evitables.

## 2.6. secado del suelo

El calentamiento solar y la introducción de vegetación son los principales factores que influyen en el secado del suelo, aunque ello también puede ocurrir si se introducen, ex profeso, elementos de

drenaje dentro de la masa térrea. En el caso de edificaciones ligeras con baja rigidez y/o resistencia, los asentamientos que se generan por secado del suelo son particularmente importantes, ya que colocan en riesgo la estabilidad de la estructura; por el contrario, los edificios monumentales de alta rigidez son menos susceptibles a este tipo de fenómenos. Asimismo, si se toma en cuenta que las reparaciones de dichas obras monumentales no son tan costosas comparadas con el valor de la construcción, la magnitud relativa del problema se atenúa notablemente.

El secado del suelo (Fig. 2.12) ocurre cuando existe un estrato superficial de suelo fino compresible que se enjuta y eventualmente se agrieta debido a una intensa desecación. Posteriormente, el agua de lluvia puede reconocer este agrietamiento, e inducir erosión interna y arrastre de los materiales hacia el interior de las grietas, lo que provoca la inestabilidad de sus paredes, que después de ciclos de fisuración y erosión generan agrietamientos de mayor magnitud (Rangel et al, s/f). Concomitantemente, cuando la infiltración de agua de lluvia en el subsuelo es suficientemente menor que la evapotranspiración, el suelo superficial comienza a secarse, dando lugar a asentamientos superficiales importantes, en un principio, y agrietamientos a largo plazo. Así como la evapotranspiración, la succión generada por los raíces de los árboles, pastos o arbustos, también pueden producir dicha desecación.



El término estiaje deriva de estío o verano, debido a que en la región mediterránea, el estío es la época de menor caudal de los ríos. El secado del suelo en estos casos se da, por un lado debido a la escasez de precipitación y, por otro, a la mayor insolación.

**Figura 2.12. Presa de Pereira a 275 km al sur de Lisboa, en julio de 2005 durante la mayor seca en Portugal y España desde 1940.**

Paralelamente al crecimiento urbano de las ciudades, las edificaciones son el blanco de las atenciones en lo que concierne a su seguridad y buen funcionamiento. La ciudad de México, en

donde la explosión urbana es sorprendente, y en donde existen grandes estratos de arcilla de baja resistencia y gran deformabilidad, es un buen ejemplo de los problemas asociados al secado del suelo. Por razones diversas, dichas arcillas están sometidas a procesos de consolidación, por lo que se generan asentamientos en las cimentaciones de tal magnitud que llegan a producir problemas en la superestructura, como por ejemplo, agrietamientos, inclinaciones o rotaciones. De igual forma, en Europa, uno de los factores que causa daños graves a los edificios son los asentamientos diferenciales originados por la introducción de vegetación y su remoción (Fig. 2.13). Por ejemplo, numerosas construcciones en la ciudad de Estocolmo han sufrido hundimientos provocados por grandes hayas y abedules que succionan de 300 a 500 l/día durante los veranos cálidos, por ello es muy importante alejar los árboles de las viviendas (Santoyo et al, 2005).



Los efectos de la plantación de árboles cercanos a las construcciones pueden ser muy destructivos.

**Figura 2.13. Banqueta en la ciudad de México destruida por un árbol.**

Cabe mencionar que la identificación de las causas de este fenómeno y su contribución individual para la magnitud de dichos asentamientos es una labor algo compleja; no obstante, es posible estudiarlo de manera cualitativa en función de observaciones externas (levantamiento de grietas en estructuras y grietas superficiales en el terreno, nivelaciones topográficas de las viviendas, medición de desniveles y desplomos, etc.) e internas (tipo de suelo, condición de esfuerzos, variación de la humedad en estratos superficiales, etc.) (Rangel et al, s/f).

## 2.7. extracción de agua de la masa de suelo

Uno de los mayores problemas provocados por la extracción de agua de la masa de suelo es el hundimiento regional. Los asentamientos que se verifican en la superficie son una expresión de los cambios que ocurren dentro de la masa de suelo debido al proceso de consolidación generado por el abatimiento de las presiones de poro, consecuencia de factores como la extracción de agua desde sótanos inundados, la influencia local de pozos de bombeo, la falla local en fracturas o fisuras abiertas en la masa de suelo.



Bajo la Catedral estuvo un pequeño templo dedicado a Quetzalcoátl, que Hernán Cortés usó como base del complejo religioso. Las estructuras enterradas junto con el hundimiento regional obligaron a la restauración del templo. Este ejemplo es hoy mencionado en todo el mundo.

**Figura 2.14. Catedral Metropolitana de la ciudad de México y El Sagrario, México.**

Las arcillas de México, por ejemplo, porque son suelos con elevado contenido de agua e índice de vacíos, presentan elevada compresibilidad. Dado que este tipo de suelos, en su estado natural, se encuentra saturado, la reducción de volumen que experimentan cuando cargados sólo ocurre a la medida que el agua se expulsa del suelo. Debido a que estos suelos son por otro lado,

poco permeables, la expulsión del agua es típicamente demorada, por lo que las deformaciones volumétricas que implican asentamientos de la superficie del terreno, pueden extenderse por períodos de tiempo muy dilatados (Matos Fernandes, 2006).



Hoy el templo da guarida al Archivo General de Notarías de la ciudad de México. La restauración del edificio permitió que sobreviviera y que, además, fuera útil a su población.

**Figura 2.15. Antiguo Templo de Corpus Christi, ciudad de México, México.**

El fenómeno mencionado ha acarreado grandes problemas a las construcciones. Los locales en donde esto suele ocurrir son zonas geológicas muy recientes, a mencionar los valles de aluvión, como por ejemplo, del litoral de los continentes, y precisamente aquellos donde se encuentran las áreas urbanas e industriales más desarrolladas y luego, la mayoría de las estructuras de ingeniería civil (Matos Fernandes, 2006). Sobretudo, el factor más relevante, en casos como la ciudad de México, Venecia o Bangkok, es la sobreexplotación de agua desde los acuíferos, es decir, la extracción de un caudal superior a la capacidad natural de recuperación, lo que conduce

al agotamiento de la fuente. Este descenso gradual del nivel de aquellos acuíferos provoca la disminución de las presiones en el agua intersticial, incrementando el esfuerzo efectivo en la masa de suelo y cambiando los parámetros que dependen de aquel esfuerzo como la resistencia al esfuerzo cortante, la compresibilidad y la permeabilidad (Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo, 2007).

Casos de asentamientos diferenciales, debidos al hundimiento regional, son muchos. En la ciudad de México son afectados monumentos como la Catedral Metropolitana (Fig. 2.14) y demás templos adyacentes a aquella, y el Ex-templo de Corpus Christi (Fig. 2.15), entre muchos otros (Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo, 2007). De la misma forma, Venecia está repleta de construcciones afectadas por el mismo tipo de problema.

Este fenómeno tan destructivo desencadenado por la abusiva extracción de agua, seguirá provocando asentamientos en las construcciones monumentales, principalmente asentamientos diferenciales, con consecuentes daños estructurales irreversibles. Esto a su vez, incrementa la vulnerabilidad de dichas construcciones a los demás agentes destructivos. Por ello, la estimación de la magnitud y distribución de los asentamientos futuros es importante para una variedad de aplicaciones prácticas, incluyendo problemas relacionados con la conservación de monumentos históricos. Dicho cálculo debe tener en cuenta la variabilidad de las propiedades del suelo, las condiciones de esfuerzos en las masas de arcilla, así como su evolución en el tiempo (Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo, 2007).

## 2.8. aumento de los contenidos de agua o humedad en la masa de suelo

El aumento del agua en el subsuelo ha sido un gran problema en varias partes del mundo. El fenómeno no solo provoca daño en las estructuras y cambio en las propiedades del suelo, sino también causa grandes problemas ambientales.

El contenido de agua o humedad en la masa de suelo puede aumentar cuando se talan árboles, en el llenado de una presa o en caso de inundación (Fig. 2.16). En este tipo de situaciones aumenta la humedad junto con una subida del nivel freático y un cambio de los esfuerzos efectivos en el suelo, lo que producirá problemas tanto de asentamientos como de capacidad de carga. El agua en el subsuelo puede afectar mucho a las estructuras enterradas y puede provocar su oxidación o degradación; como resultado, suelen aparecer algunas cavidades en la cimentación. En las zonas superficiales, en donde el nivel del agua sube, ocurren fenómenos de colapso en regiones no saturadas. La subida del nivel freático también aumenta la susceptibilidad del suelo a licuación, y aumenta el empuje vertical ascendiente lo que puede inducir filtración a cualquier estructura subterránea.



En Venecia las constantes inundaciones afectan no solamente a la vida de su población sino también a sus construcciones seculares.

**Figura 2.16. Casa inundada, Venecia, Italia.**

En casos como el de Holanda, en el muro romano (Fig. 2.17) que rodea a la ciudad de Hertogenbosch, una situación de subida del nivel del agua implicó tanto la degradación de los materiales como el cambio de esfuerzos aplicados en el muro (Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib, 2005).



La ciudad de Hertogenbosch fue fundada con un muro romano, obra imponente conservada a lo largo de los años, que un día protegió a los holandeses; hoy ellos retribuyen, conservándolo.

**Figura 2.17. Muro romano que rodea Hertogenbosch, Holanda.**

Teniendo en mente que el fenómeno del aumento del contenido de agua en el subsuelo puede generar problemas en las construcciones existentes, y que muchas veces no son previsibles, la realización de medidas preventivas es fundamental, ya que puede salvar al patrimonio y ahorrar en una eventual medida correctiva.

## 2.9. presencia de estructuras vecinas

Los efectos de interacción entre el monumento histórico y las estructuras que lo circundan pueden crear problemas de asentamientos importantes, los cuales en el peor de los casos pueden ser diferenciales, resultando en la inestabilidad de la estructura.

La interacción entre construcciones vecinas es un problema común en monumentos históricos. Con el crecimiento urbano de las ciudades, las construcciones antiguas son muchas veces lindantes de construcciones más recientes, que por su peso o tipo de cimentación influyen en el comportamiento de las primeras induciéndoles asentamientos, y por ende inclinaciones o rotaciones. Este fenómeno, en concomitancia con el hundimiento regional, es un problema que afecta a la mayoría de las edificaciones monumentales del centro histórico de la ciudad de México.

Un ejemplo notorio de interacción entre construcciones vecinas es la Casa de los Azulejos (Fig. 2.18); las cimentaciones piloteadas del edificio Guardiola colindante al monumento, en concomitancia con el hundimiento regional, provocan que el subsuelo adyacente se “cuelgue” en su periferia, impidiendo que el costado vecino a la cimentación piloteada siga al hundimiento

regional, provocando el giro de la estructura en la dirección contraria (Ovando Shelley et al, 2008). Otro caso importante es el de la Capilla de las Ánimas (Fig. 2.19), en las traseras de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México, la cual indujo asentamientos diferenciales durante los trabajos de subexcavación que se llevaron a cabo entre 1993 y 1995 que, a su vez, provocaron esfuerzos adicionales a la pequeña construcción (Ovando Shelley et al, 2008). Además de ello, la Capilla interactuó con el cajón del Metro, ubicado a pocos centímetros de su costado norte. En la misma zona del centro histórico se encuentra el Palacio Nacional (Fig. 2.9) que también sufre de la interferencia de las estructuras vecinas.



La casa cubierta de azulejos es uno de los monumentos que sufre con el crecimiento urbano de la ciudad metropolitana de México, debido a los edificios que se fueron construyendo en sus colindancias.

**Figura 2.18. Casa de los Azulejos, ciudad de México, México.**



La capilla se encuentra muchas veces clausurada por su estado de conservación precario. Se mantiene parada quizás por dignidad y respeto a la imponente obra religiosa que avecinda con sus muros: la Catedral Metropolitana de la ciudad de México.

**Figura 2.19. Capilla de las Ánimas, ciudad de México, México.**

El problema de estructuras colindantes a los monumentos puede que no se perciba en el corto plazo, esto es, poco tiempo después del término de la construcción del edificio nuevo. Sin embargo, en el largo plazo puede ser condicionante del comportamiento y estabilidad del monumento antiguo.

## 2.10. discontinuidades inducidas

Los factores que generan la aparición de discontinuidades en el subsuelo incluyen la erosión, la pérdida de agua desde cisternas o depósitos, y la construcción de túneles, u otras estructuras subterráneas, como estacionamiento o líneas de metro, minas o excavaciones, así como de taludes o cortes. En este grupo también se puede incluir la infraestructura urbana, conjunto básico de soporte para el desarrollo de cualquier actividad o función necesarios en la organización estructural de una ciudad, como son las redes de agua potable, de desagüe, electricidad, teléfono, gas, entre otras.



La torre del reloj es uno de los símbolos de Londres. Tanto el Big Ben como el Underground se denotan en el horizonte y son importantes en diferentes formas para los londinenses. Por ello, es importante que ambas construcciones se respeten; la construcción de la nueva línea del Underground implicó a priori la evaluación de riesgos a la obra monumental que le encima.

**Figura 2.20. Vista del Big Ben y de la entrada del Underground, Londres, Inglaterra.**

De esta forma, la construcción de obras posteriores a los monumentos históricos, ya sean subterráneas, como estacionamientos, líneas de metro, etc., o superficiales, pueden inducir la aparición de fuerzas en la estructura existente, y finalmente conducir al mal funcionamiento del edificio. Del mismo modo, dichas construcciones también pueden penetrar las cimentaciones de los monumentos, constituyendo apoyos indeseables, o al cabo causar su destrucción. Estos problemas inducirán asentamientos, principalmente diferenciales, a las construcciones existentes en la superficie. Por lo demás, en caso de funcionamiento inadecuado de la infraestructura urbana, como fisuras o fracturas en tuberías, pérdida de agua desde cisternas o depósitos, se pueden originar asentamientos; esto puede cambiar notoriamente las condiciones existentes en el subsuelo, lo que afecta directamente a la superestructura.



La afamada obra de Gaudí, todavía en construcción, será “superior” a una nueva línea de trenes, la cual tendrá que respetar en la totalidad a la joya arquitectónica del modernismo catalán.

**Figura 2.21. Sagrada Familia, Barcelona, España.**

Una vez más, el caso de la Capilla de las Ánimas (Fig. 2.19), en la Ciudad de México, es de mencionar ya que las sobrecargas impuestas debido a la construcción de la línea 2 del Metro indujeron asentamientos diferenciales importantes (Ovando Shelley et al, 2008). En la misma ciudad, la Casa de los Azulejos (Fig. 2.18) y el Palacio Nacional (Fig. 2.9) son ejemplos notables de este tipo de problemas; la construcción del sistema de drenaje profundo en la Ciudad de México, y el subsiguiente mal funcionamiento, afectaron excesivamente a los monumentos; en estos casos, la presencia de colectores profundos, o semi-profundos, incrementaron los abatimientos piezométricos, lo que provocó asentamientos (Ovando Shelley et al, 2008). En Europa, la construcción de los túneles del Underground en Londres (Burland, 2002) también constituyen una discontinuidad para el Big Ben (Fig. 2.20), así como la construcción prevista de la

nueva estación en Barcelona irá seguramente afectar a la Sagrada Familia (Fig. 2.21), obra singular del arquitecto Antoni Gaudí (Bonet i Armengol et al, 2006); igualmente, en el viejo continente, la estabilidad de la Torre de Pisa (Fig. 2.5) fue afectada por la construcción del *catino* (Jamiolkowski et al, 1999).

En una traza urbana compleja, los estudios previos a la realización de una obra de infraestructura son esenciales ya que, aquellas obras pueden afectar a las construcciones superiores, problema agravado en el caso de las construcciones históricas por su antigüedad y consecuente vulnerabilidad. En el caso de los monumentos históricos, el estudio cuidadoso de las posibles implicaciones que uno de los sucesos anteriormente mencionados puede causar a la construcción es fundamental, ya que es posible evitarlo en la mayoría de los casos, al contrario de muchos otros problemas mencionados en este capítulo.

## 2.11. comentarios finales

Como se pudo verificar en las páginas anteriores, por todo el mundo existen edificios que padecen los efectos de varios factores relacionados con el suelo subyacente. Estos factores provocan asentamientos, los cuales son más dañinos cuando se hacen diferenciales, colocando en peligro al patrimonio arquitectónico. De igual forma, aparecen problemas de cimentaciones y capacidad de carga, los cuales obligan a intervenciones urgentes porque el riesgo que inducen es en un plazo más corto.

Así, muchos monumentos históricos han sobrevivido inclinados, agrietados, torcidos y hundidos, lo que obliga a que la geotecnia avance a galope. Aún con todo, el futuro de una gran cantidad de monumentos es incierto ya que están expuestos a los grandes temblores, a impetuosos fenómenos naturales, y al hundimiento regional, problema inducido por el Hombre, asociado al explosivo y desordenado crecimiento de las ciudades.

De la misma forma, las sucesivas intervenciones estructurales en los edificios y la introducción de materiales con características mecánicas radicalmente diferentes a las de los elementos originales, podrán enflaquecer la estructura de los edificios relativamente a la acción de los sismos.

En la siguiente tabla se resumen los problemas geotécnicos que suelen afectar a las construcciones monumentales, así como los factores que los influyen.

<b>origen o fuente</b>	<b>factores de influencia</b>
errores de origen: diseño y/o construcción	arquitectónico, geométrico, estructural, geotécnico, o combinación de cualquiera de ellos inhabilidad para obtener la verticalidad y/o ángulos rectos en muros, techos, etc. alteración, o remoldeo, del suelo al nivel de la cimentación
cambios en los edificios	sucesos accidentales y/o deterioro alteraciones arquitectónicas y/o estructurales
efectos sísmicos	características del sismo características dinámicas de la estructura y del subsuelo
condiciones geotécnicas en el sitio	variaciones del espesor de estratos de suelo distribución errática de compresibilidades estructuras enterradas
secado del suelo	calentamiento solar introducción de vegetación, principalmente árboles
extracción de agua de la masa de suelo	hundimiento regional remoción de agua de sótanos inundados influencia local de pozos de bombeo falla local en fracturas o fisuras abiertas en la masa de suelo
aumento en los contenidos de agua o humedad en la masa de suelo	remoción de árboles acorralamiento de presa inundación
presencia de estructuras vecinas	crecimiento urbano peso y tipo de cimentación de edificios colindantes en zonas propicias al hundimiento regional
discontinuidades inducidas	erosión pérdida de agua desde cisternas o depósitos fracturas de líneas de aguas residuales o suministro de agua construcción de túneles, minas, excavaciones u otras obras subterráneas, como estacionamientos o líneas de metro

**Tabla 2.1. Origen de los asentamientos diferenciales y factores de influencia.**

## soluciones geotécnicas



Las pirámides egipcias son de las mayores construcciones de la humanidad. En 2750 a.C. eran capaces de construir, bajo condiciones adversas, estas estructuras de mampostería, colocada alrededor de un núcleo central, con sus cámaras funerarias enterradas, probando que hoy los ingenieros no llegan al atrevimiento de los faraones del antiguo Egipto.

**Figura 3.1. Necrópolis de Giza, ubicada en la meseta de Giza, en las cercanías de Cairo, Egipto.**

### 3.1. consideraciones iniciales

Una solución geotécnica es una medida de remediación que tiene la finalidad de mitigar los efectos de los problemas geotécnicos y de cimentaciones. El grado de daño presente en el monumento influye en el tipo, magnitud y naturaleza de dicha medida.

Para elegir adecuadamente la solución a emplear, las condiciones del suelo y de las cimentaciones deben determinarse con el mayor detalle para lo cual se pueden usar sondeos, pozos u otros métodos de exploración de campo. Dicha exploración debe ser planeada y ejecutada cuidadosamente para evitar dañar al monumento, por lo que se recomienda contar con la presencia de arqueólogos en el sitio para supervisar el trabajo y registrar o rescatar cualquier hallazgo significativo.

Las restricciones económicas pueden limitar el alcance de los trabajos mencionados y por lo tanto, es necesaria una elección cuidadosa de las técnicas exploratorias con maximización de la efectividad del costo.

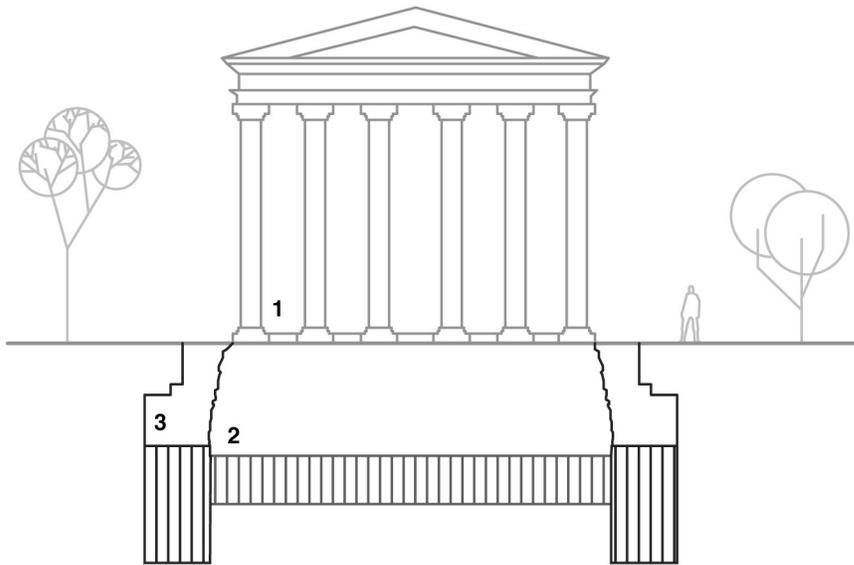
De acuerdo con el período de tiempo en el cual actúan, las soluciones geotécnicas se pueden clasificar en temporarias o permanentes. Una medida temporaria es adecuada cuando las causas del problema no están completamente identificadas; no obstante, cuando el proyecto está bien definido, suelen adoptarse como parte de una secuencia de trabajos geotécnicos. La aplicación de una solución permanente en ocasiones implica modificar la cimentación original, pero en todos los casos se tratan de acciones irreversibles en las cuales la posibilidad de retorno no se considera en el proyecto. Las soluciones geotécnicas también se pueden clasificar como preventivas o correctivas, de acuerdo con el problema geotécnico y la solución adoptada en el proyecto.

### 3.2. rehabilitación de los elementos originales de cimentación

La rehabilitación de los elementos originales de la cimentación es una medida permanente. Por lo general, se usa con carácter preventivo, ya que se adopta cuando hay que asegurar la estabilidad de la estructura monumental ante el riesgo de acciones futuras y previsibles, mediante la recuperación o mejora de la condición de la cimentación existente.

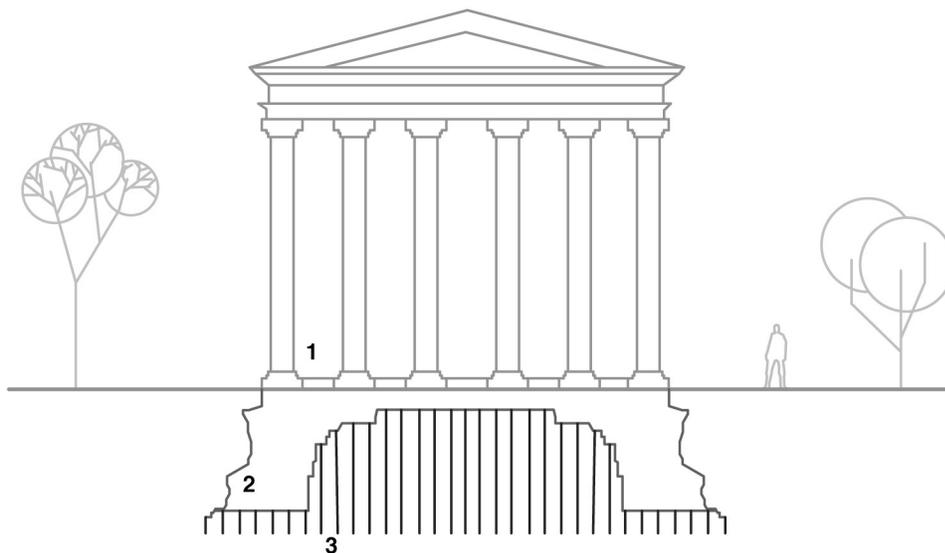
Una forma de rehabilitar, una parte o el todo de una cimentación, es el alargamiento o el ensanchamiento de la cimentación (Fig. 3.2) con elementos de material similar al original o con otros más actuales. Se debe notar que la conexión estructural con la superestructura es fundamental para lograr el adecuado funcionamiento del conjunto; a veces hay que destruir parte de la cimentación o de la estructura para lograr dicha conexión. Otra forma de intervención, en casos que la cimentación ya no se encuentre en buen estado de conservación, es reponer totalmente la zona dañada (Fig. 3.3) empleando materiales parecidos o iguales a los originales, tratando de preservar la parte que todavía se encuentra en buen estado. Cualquiera de las

técnicas de rehabilitación mencionadas, implican que la intervención sea por partes para que la superestructura no sufra movimientos significativos que, a su vez, pongan en riesgo la estabilidad o integridad del monumento.



1. superestructura 2. cimentación original 3. cimentación nueva

**Figura 3.2. Alargamiento de la cimentación existente.**



1. superestructura 2. cimentación preservada 3. cimentación desmantelada

**Figura 3.3. Desmantelamiento de la cimentación existente.**

Asimismo, cuando se rehabilitan los elementos originales de cualquier parte del monumento, se tiene la posibilidad de conservar su fisonomía original. Por el contrario, cuando hay que destruir parte de la cimentación porque, de alguna forma, ya no funciona estructuralmente o, en el peor de los casos, ya “incomoda” a la nueva cimentación, se está violando el principio básico de la conservación de monumentos, es decir se ocasiona la destrucción del testigo histórico. Ambas soluciones son efectivas siempre y cuando se identifica adecuadamente el factor de origen del problema y se tiene un buen conocimiento de las condiciones geotécnicas en el sitio.

El ensanche o alargamiento de cimientos es una solución a la cual se recurre mucho en la restauración de monumentos, tanto en las obras más imponentes como en las construcciones de menor porte. En Venecia se realizó el alargamiento de la cimentación existente del Campanario de San Marcos (como se describe en el punto 4.3.2) con la finalidad de reducir la presión de contacto transmitida al suelo. En el Templo de Bayon, en Camboya, se dismanteló una parte de la cimentación y se mantuvo otra, ya que estaba en buen estado de conservación (caso detallado en el punto 4.6); la cimentación de repuesto se realizó con una mezcla de suelo-cemento.

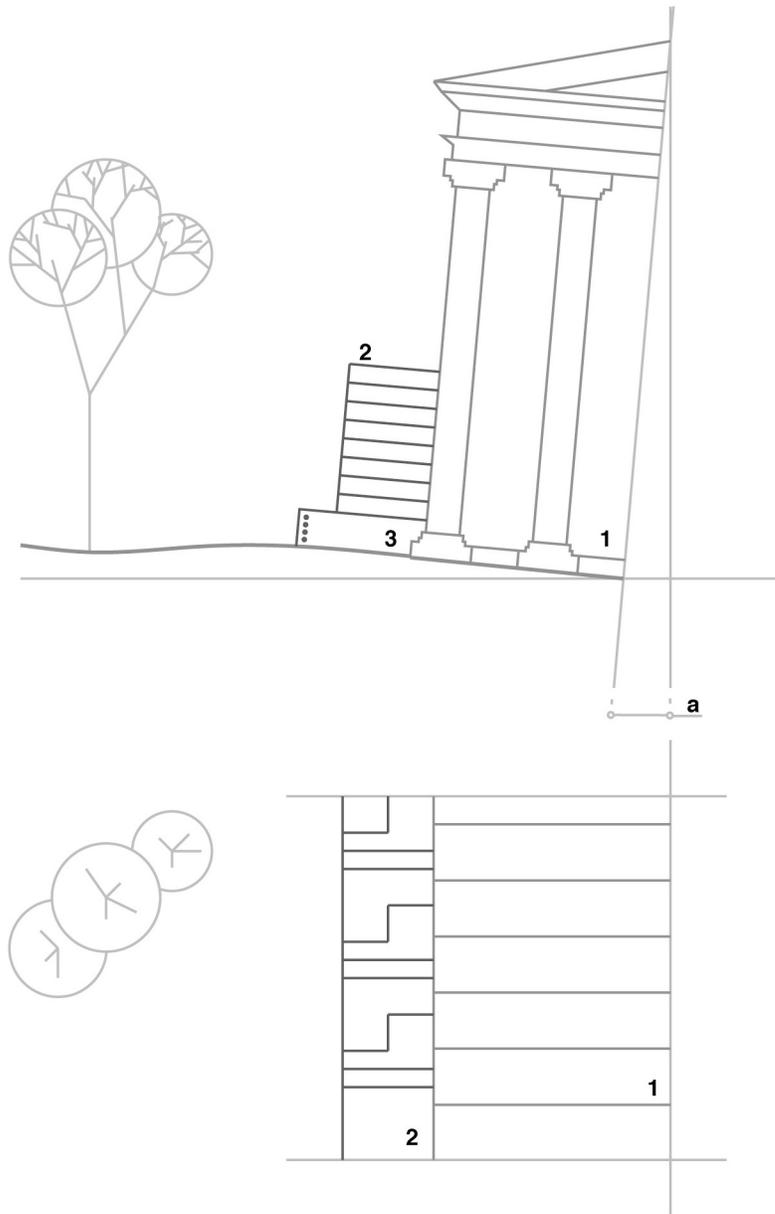
Por la importancia arquitectónica de muchos edificios esparcidos por todo el mundo, y por los bajos presupuestos que muchas veces se manejan principalmente en las construcciones de menor porte, ambas soluciones son muy atractivas y usadas. Por otra parte, son medidas que cumplen con muchas de las recomendaciones de las Cartas Internacionales de Restauración, siempre y cuando, no se destruya o altere significativamente el “sub-patrimonio” existente.

### 3.3. lastre

El lastre se puede considerar como una medida correctiva que se aplica en un área adecuada del monumento, o cerca de él, con la intención de inducir un asentamiento para compensar inclinaciones y desplomos. Además, la medida puede tener carácter permanente o temporal, dependiendo de lo previsto en el diseño.

La técnica del lastre consiste en la colocación de contrapesos en el lado menos hundido de la construcción, por etapas determinadas o todo el material a la vez (Fig. 3.4). La primera opción es más adecuada en términos de control de las condiciones de seguridad del edificio (Ovando y Santoyo, 2003). En muchos casos el lastre está constituido por grandes bloques de plomo pero también se recurre al empleo de arena seca o húmeda, a veces "en costales". El agua también se ha utilizado como lastre, por medio de la inundación de celdas o compartimientos para generar, selectivamente, asentamientos correctivos.

Por razones principalmente estéticas, la colocación de lastre en monumentos históricos, como solución permanente, no es fácilmente aceptada, aunque temporalmente se admite su uso. Por lo demás, en la ciudad de México el empleo de esta técnica como medio para corregir inclinaciones de edificios ha demostrado ser muy poco eficiente; sin embargo, cuando se distribuyen adecuadamente los contrapesos, ellos pueden mejorar la respuesta sísmica de la edificación (Ovando y Santoyo, 2003).



- 1. muro de mampostería de la superestructura
- 2. lastre 3. anillo de concreto
- a. inclinación del edificio

**Figura 3.4. Esquema de colocación de lastre.**

El lastre con carácter temporal se ha aplicado en la Torre de Pisa (como se menciona en el punto 4.4), al igual que en algunos edificios de la ciudad de México, y en muchas otras construcciones históricas en el mundo.

La colocación de contrapesos en edificios monumentales reduce las inclinaciones y los acerca a la vertical con lo cual, en cualquier caso, mejora la estabilidad del edificio. En la ciudad de México

la experiencia muestra que la solución tiene baja efectividad cuando usada como medida temporal, por lo que es más aplicable a largo plazo.

### 3.4. subexcavación

El Campanario de St. Chad, en Inglaterra, es el caso más antiguo documentado de una subexcavación (relatado en el punto 4.8). A su vez, Terracina en 1962 propone reducir la inclinación de la Torre de Pisa recurriendo a este método (como se detalla en 4.4). En México, las ideas italianas fueron adaptadas a las condiciones del centro histórico capitalino, y luego usadas en numerosos edificios; el primer experimento en edificios monumentales se realizó en el pequeño templo de San Antonio Abad, con el fin de desarrollar técnicas y probar su confiabilidad en la corrección de asentamientos diferenciales, y finalmente fue aplicado en la Catedral Metropolitana y en El Sagrario (descrito en el punto 4.2.1).

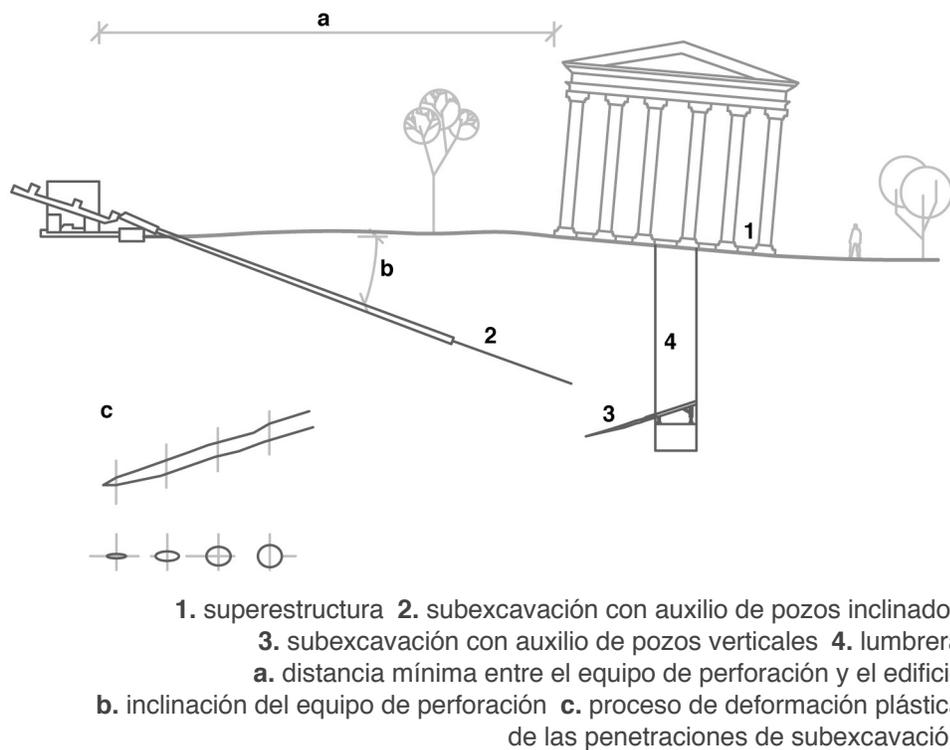
La subexcavación podría ser considerada como una medida permanente ya que sus efectos se denotan por períodos de tiempo relativamente largos; sin embargo, en casos como la Catedral Metropolitana de la ciudad de México se requiere de aplicación periódica, por lo que también puede considerarse como intervención temporal. Conviene mencionar que la subexcavación puede ser concebida como una renivelación (Santoyo y Segovia, 1999), con carácter correctivo. Renivelar con esta técnica consiste en hacer descender la zona de la estructura que quedó más elevada en relación a lo demás.

El principio del método consiste en la remoción de pequeños volúmenes de suelo de las zonas del monumento más elevadas, produciendo de tal forma la reducción de asentamientos diferenciales; puede ser usada con carácter preventivo o correctivo, dependiendo del proyecto. El programa de implementación de una subexcavación en un edificio histórico debe ser cuidadosamente fijado por un grupo interdisciplinario de expertos en restauración de monumentos, y de acuerdo con los hundimientos que ya afectan a la estructura.

La técnica se inicia con la realización de un conjunto de pequeñas horadaciones horizontales, o inclinadas, en el suelo que subyace a la construcción monumental, con auxilio de pozos (o lumbreras) verticales (como realizado en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México), o trincheras perimetrales (como en el caso de la Torre de Pisa) (Fig. 3.5); los huecos se cierran debido a los esfuerzos que soporta dicho suelo, y consecuentemente se induce un hundimiento correctivo en la superficie; una vez cerrados estos pequeños túneles, se realiza una nueva horadación (Santoyo et al, 2005). Los hundimientos correctivos necesarios y previstos en el proyecto se alcanzan repitiendo sucesivamente el procedimiento.

Los efectos de la subexcavación pueden ser difíciles de predecir o estimar por lo que se debe basar en el Método Observacional (descrito en el capítulo quinto). Sin embargo, la velocidad de los asentamientos correctivos puede ser controlada, por tanto, los riesgos de intrusión en el monumento se reducen mucho. El proceso de intervención puede también requerir de trabajos auxiliares, como trincheras o pozos, así como de equipo de perforación especial, y de esta manera el costo de los trabajos sube de forma considerable. Conviene señalar que, el uso de esta técnica se puede realizar sin afectar estructural o funcionalmente a la edificación (es decir, no-

obstructora, como en la Torre de Pisa), además de que es una medida adaptable a una larga variedad de condiciones, lo que supone ventajas con respecto a otras técnicas. No obstante, hay casos en que no es posible realizar las operaciones con el inmueble en funcionamiento, o sin destruir estructuras enterradas y aún zonas del monumento, por lo que se convierte en una medida bastante obstructora (como fue imprescindible en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México).



**Figura 3.5. Procedimiento de la subexcavación usado en la Torre de Pisa (izquierda) y en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México (derecha, bajo el edificio).**

La técnica de subexcavación puede ser muy consistente con los principios de la restauración de monumentos históricos, por lo que puede ser alternativa a otros métodos de recimentación actuales que no verifican los mismos requisitos. Siempre que posible, se debe intentar usar el método con el mínimo de obstrucción necesaria, por lo demás, la subexcavación es una intervención reversible, o si necesario, repetible, y también es invisible. Asimismo, los principios de la subexcavación deben tomar en cuenta las preocupaciones, no solamente técnicas, pero también de conservación e históricas relacionadas con los edificios; finalmente, aun en los casos de grande obstrucción en el monumento, es más importante el objetivo final: ¡conservar lo visible!

### 3.5. adición de elementos de cimentación profunda

La adición de elementos de cimentación profunda, como pilotes, micropilotes u otros, es una medida permanente y casi siempre irreversible, para evitar o corregir los asentamientos diferenciales, ya que se colocan en el lado menos hundido del monumento no permitiendo que la zona intervenida se asiente tanto como lo demás. En algunos casos este tipo de medida se usa para mejorar la cimentación existente por medio de la recimentación de todo el monumento, por lo que se recurre a estos elementos adicionales como “refuerzo”. Asimismo, puede ser considerada como una solución preventiva o correctiva, dependiendo del problema a tratar.

En los siguientes párrafos se discuten algunas soluciones usuales para recimentación de monumentos, como micropilotes ligados a la cimentación, instalados como reductores de la deformabilidad del monumento. También se mencionan los pilotes de control, que se han aplicado en la capital de México, y los pilotes de punta con control mecánico y funda que se usaron en la recimentación de la Capilla de las Ánimas en la misma ciudad.

Para aplicar este tipo de soluciones, primeramente, los pilotes deben ser hincados o colados en el lugar, por lo que se requieren modificaciones estructurales significativas en el sistema de cimentación del monumento. Igualmente, la superestructura tiene que ser adaptada y/o reforzada para tolerar los movimientos impuestos.

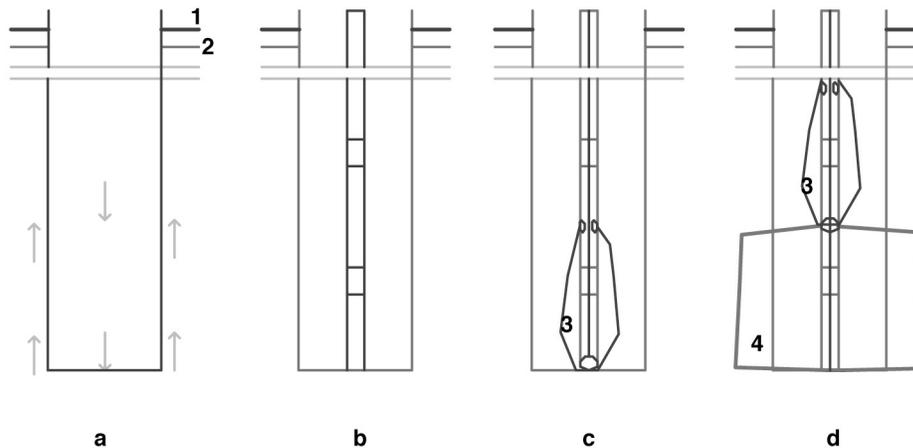
Todas estas soluciones evitan o disminuyen notablemente la aparición de asentamientos diferenciales en la construcción por lo que usualmente se elimina el problema de origen. A pesar de efectivas, en la mayoría de los casos, pueden dañar, alterar o aún destruir completamente las cimentaciones existentes, testigo histórico que porta el monumento.

#### 3.5.1. micropilotes

La técnica nace en Italia gracias a Fernando Lizzi, en 1950, que patentó el llamado “Pali Radice”, un micropilote de concreto con diámetro entre 10 y 25 cm; más tarde estos inspiran la creación de los micropilotes actuales (Santoyo y Segovia, 1999). Los micropilotes se conectan a la superestructura por lo que soportan fuerzas de tracción y de cortante basal, caso contrario podrían ser considerados como una inclusión rígida, es decir un elemento con resistencia y rigidez distinta a la del suelo, sin unión estructural a la cimentación del edificio. Por lo demás, los micropilotes pueden ser verticales o inclinados.

Un micropilote clásico (Fig. 3.6) consiste en un tubo de acero con hoyos laterales, el cual es introducido en el subsuelo en una perforación previa; posteriormente se inyecta lechada de cemento por los hoyos laterales, para salir e incrementar el área transversal y el confinamiento del pilote (Santoyo y Segovia, 1999). En la mayoría de los casos el tubo de acero no es recuperado, por lo que tiene función estructural. En México, la empresa TCG desarrolló un micropilote con tubo de PVC (Fig. 3.7), ya que la capacidad del acero de alta resistencia se desperdicia (Santoyo y Segovia, 1999), es decir, para inyectar el mortero no es indispensable un tubo tan resistente, por lo que el refuerzo debido a dicho material estaría sobredimensionado. Los micropilotes también poseen manguitos (*tubes à manchete*); con la presión inducida en la lechada, aquellos se rompen lográndose un área de pilote adecuada; nuevamente, la empresa

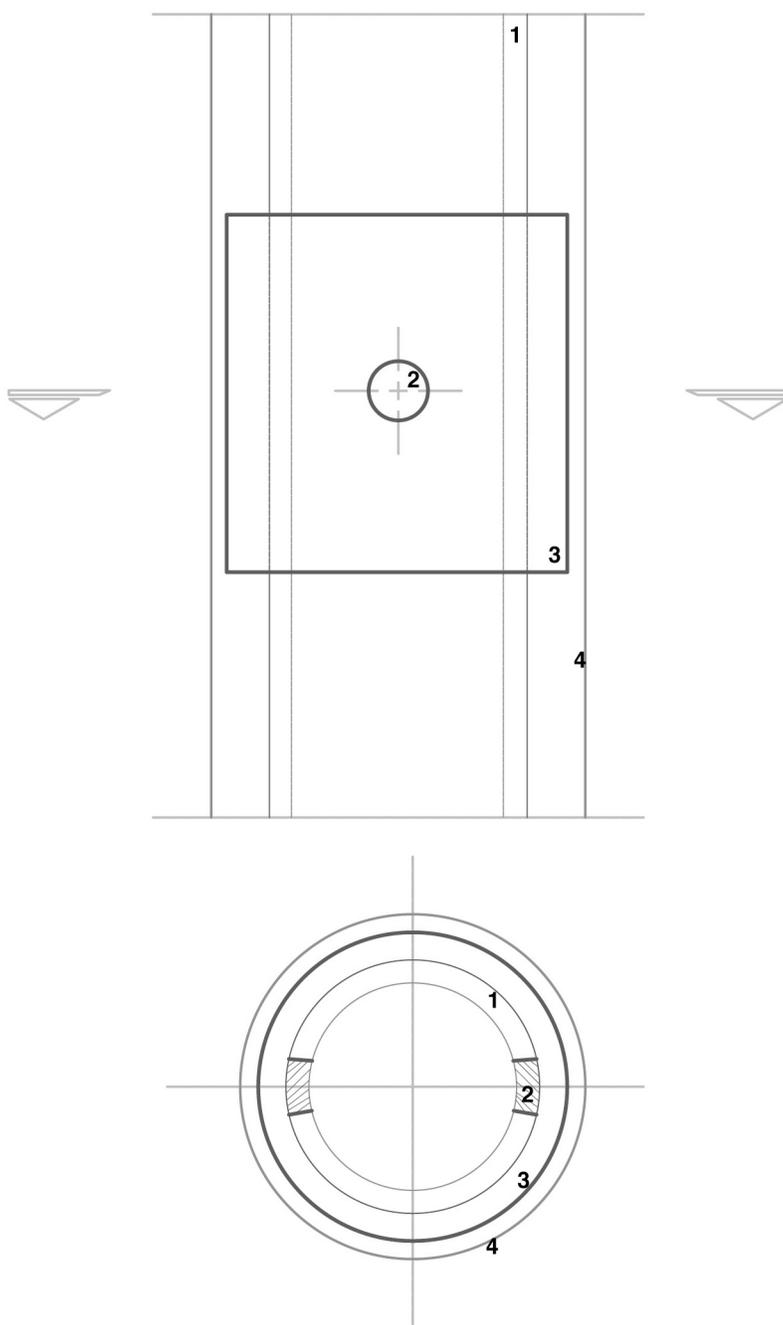
mexicana TGC adicionó una funda de tela (Fig. 3.7), entre el suelo y el tubo con hoyos laterales, para que la vaina del micropilote no se contamine con el suelo (o viceversa), quedando el pilote con una resistencia inferior a la prevista, y para que la presión con la que sale la lechada no induzca el fracturamiento hidráulico de las arcillas blandas, caso contrario se estaría aplicando la técnica de inyección de morteros por fracturamiento hidráulico (como descrito en 3.10.3). Puede afirmarse que los micropilotes son esencialmente pilotes de fricción, aunque en número adecuado y contando con un estrato resistente de apoyo, desarrollan capacidad por punta; cabe resaltar que para la capacidad friccional del pilote aumente, el micropilote debe ser mayor que el barreno.



1. nivel de piso de la estructura 2. nivel de sótano  
 3. vaina del micropilote después de inyectada  
 4. vaina del micropilote después de inyección de aire a presión
- a. perforación b. colocación del tubo con perforaciones laterales, y por veces, una funda de tela previamente al tubo c. inyección de lechada de cemento por los hoyos laterales para formación de la vaina, con auxilio de un tubo con obturadores superior e inferior d. inyección de aire a presión para formación del bulbo, y posterior inyección de la vaina superior

**Figura 3.6. Procedimiento constructivo de un micropilote tipo TGC.**

La virtud fundamental de los micropilotes en trabajos de recimentación, radica en el hecho de que son un buen complemento a la cimentación antigua. No obstante, a corto plazo, los micropilotes no trabajan, y toda la carga es soportada por la cimentación existente; conforme la estructura se va asentando, solicita el trabajo del micropilote y a largo plazo pueden llegar a tomar la carga total a una determinada deformación. Una gran ventaja es que la maquinaria para la realización de la inyección del micropilote es portátil, por lo que gana terreno en relación a otras técnicas de recimentación profundas. Pero como en cualquier intervención con pilotes, hay que destruir el piso del monumento así como eventuales estructuras enterradas.



1. tubo de PVC con perforaciones laterales 2. perforación del tubo de PVC  
 3. manguito de neopreno, hule o plástico 4. funda de tela

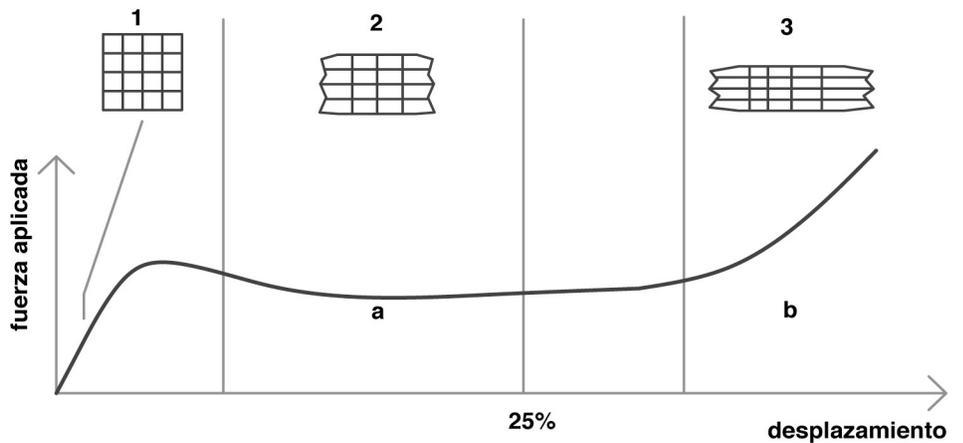
**Figura 3.7. Detalle de un manguito, como usado por la empresa TGC.**

Los ejemplos del uso de micropilotes son variados. Por ejemplo, en el templo de Corpus Christi, en la ciudad de México, se llevó a cabo la instalación 87 micropilotes para refuerzo de la cimentación y como medida preventiva (detallado en el inciso 4.2.5).

La instalación de micropilotes complementarios a la cimentación es una técnica de recimentación con innumerables aplicaciones, por lo que muchos países han adoptado esta forma particular de piloteo en la restauración de monumentos.

### 3.5.2. pilotes de control

Este tipo de pilotes fue concebido por Manuel Gonzáles Flores en 1948, para recimentar estructuras. Un pilote de control (Fig. 3.9) posee un dispositivo que regula la carga aplicada a su cabeza, así como el desplazamiento vertical de la superestructura. Los pilotes no están conectados a la cimentación pero las cargas en la cabeza de cada pilote son aplicadas a través de un marco de reacción (Santoyo y Segovia, 1999). Entre este marco y el pilote, se colocan cubos de madera caobilla que se comporta como un material elastoplástico, y la fuerza que induce la fluencia del conjunto determina la carga máxima que puede ser aplicada a la cabeza del pilote. En la gráfica que sigue se puede observar el punto a partir del cual se da la fluencia de los cubos de madera; antes de este punto, previamente determinado, se puede garantizar que cada cubo transmite una carga fija a la cabeza del pilote, para un amplio rango de deformación en el cubo. Conocida la carga que se desee que tome el pilote, bastará dividir ese valor entre la carga de falla del cubo de madera para determinar el número de cubos que han de colocarse por capa (Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2000).



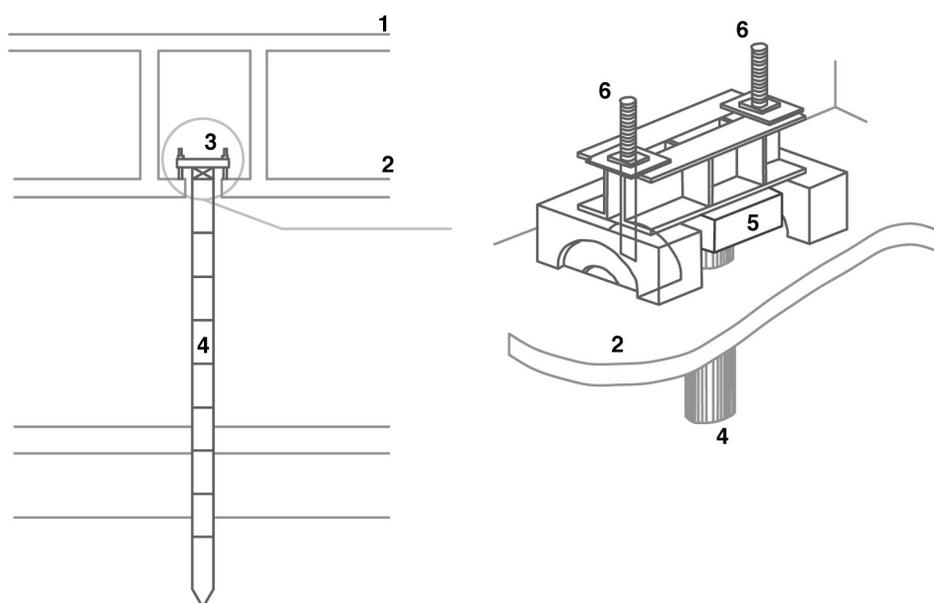
- a. zona de control de esfuerzos (zona de fluencia de los cubos de madera)
- b. zona de nueva acumulación de carga
- 1. cubos de madera no deformados (estado inicial) 2. cubos de madera con menos de 25% de deformación aproximadamente 3. cubos de madera muy deformados (desplazamiento y carga no controlados)

**Figura 3.8. Relación fuerza desplazamiento en los cubos de madera de un pilote de control.**

De esta manera, los pilotes controlan la fuerza máxima que puede aplicarse, cuando los cubos de madera trabajan en su estado de fluencia. Si estos cubos sufren deformaciones excesivas, el peligro está en que los pilotes puedan llegar a un punto de recepción de toda la carga. Después de que se da la fluencia del conjunto, los pilotes están incapacitados de tomar cargas mayores y

los desplazamientos continúan acumulándose; cuando los cubos se han deformado más del 25% el sistema comienza a tomar cargas nuevamente; de esta forma, el concreto del pilote puede fallar por aplastamiento, y es necesaria la sustitución previa de los cubos de madera.

Los pilotes de control permiten regular el descenso de las estructuras, principalmente en edificios sobre pilotes de punta que manifiestan emersiones relativas (Santoyo et al, 2005). A pesar de esto, la solución tiene varias limitantes: en caso de que la estructura sea deformable los cambios de los cubos de madera deformados deben planearse cuidadosamente pues inducen descarga alternada de los pilotes, lo cual puede causar asentamientos diferenciales. Los pilotes de control no toman cargas de tensión lo que debe tenerse muy presente al diseñarlos contra momentos de volteo sísmicos. Además, su capacidad para tomar cortante basal es limitada (solamente los “espárragos” del control (Fig. 3.9) se conectan a la estructura y al pilote). Con respecto al mantenimiento, es difícil controlar uniformemente la deformabilidad de la madera, principalmente cuando hay exceso de humedad, así como la corrosión de las partes de acero.



1. piso de la estructura 2. losa del nivel de sótano 3. control  
4. pilote 5. cubos de madera 6. “espárragos”

**Figura 3.9. Pilote de control.**

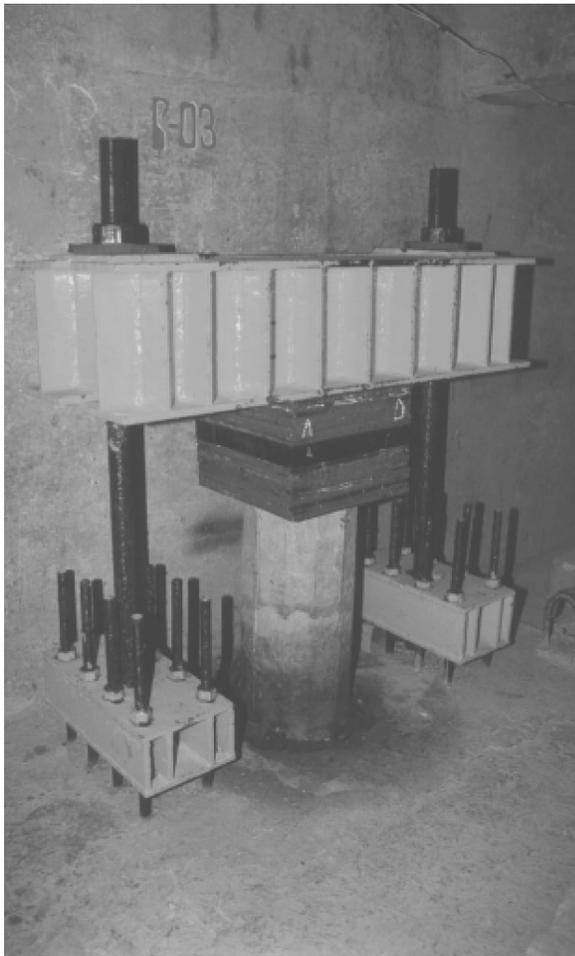
En la ciudad de México los casos de recimentación con pilotes de control son muchos. Indudablemente, la Catedral Metropolitana y El Sagrario (descrito en el inciso 4.2.1) son los más conocidos, pero también se usaron en otros monumentos históricos, como en el Palacio Nacional.

En la Catedral Metropolitana y en El Sagrario, la técnica no fue efectiva por la carencia de un número suficiente de pilotes. Asimismo, lo que se debe evitar a futuro son los errores cometidos en muchos edificios de la capital de México, como la incongruencia entre el número de pilotes y las cargas que soportan; en el uso de esta técnica como de cualquier otra, es imprescindible un buen análisis y diseño de las condiciones geotécnicas y estructurales del edificio. Finalmente

conviene mencionar que, en masas de suelos sujetas a hundimientos, los pilotes de capacidad por punta están sujetos a fuertes fuerzas de fricción negativa que deben tomarse en cuenta adecuadamente en el diseño.

### 3.5.3. pilotes con control mecánico y/o funda

En México se han desarrollado pilotes con control mecánico (Fig. 3.10), provistos o no de funda metálica, para evitar la trasmisión de fricción negativa.

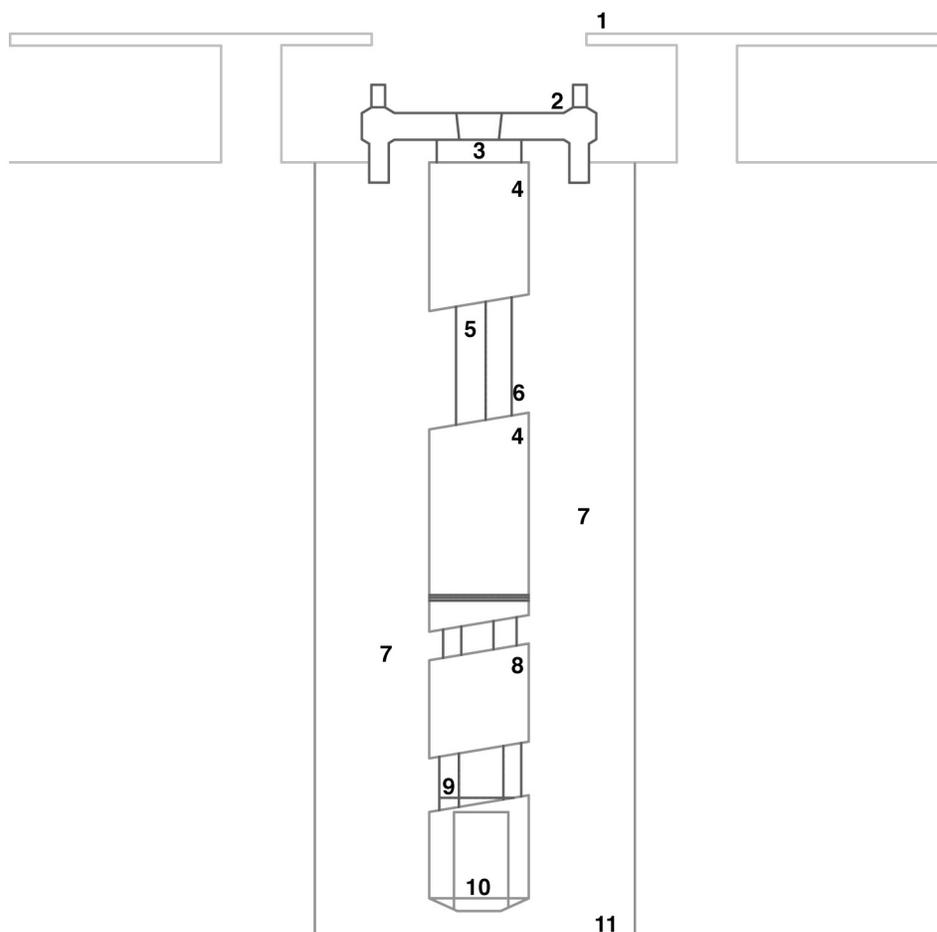


Las celdas de control metálicas requieren de menor mantenimiento que las celdas de madera.

**Figura 3.10. Pilote de control mecánico con funda, tipo TGC.**

Por un lado, la utilización de la funda de acero (Fig. 3.11) permite aprovechar la totalidad de la capacidad por punta en pilotes apoyados en estratos duros o depósitos profundos, y evitar los efectos de la fricción negativa; de forma similar, la grasa mineral evita fuerzas de fricción entre el

pilote y la perforación. Por otro, los sistemas mecánicos (Fig. 3.11) de ajuste poseen leyes de deformación más definidas que las celdas deformables (de madera u otros materiales usados en los pilotes de control); sin embargo, en este tipo de pilotes la fuerza ya no puede ser controlada (como en la madera), pero si el desplazamiento de la estructura, por lo que el pilote en general debe estar muy sobredimensionado. Usualmente, son necesarios cambios estructurales en el monumento para apoyo de los pilotes de punta, como por ejemplo vigas de concreto reforzado adosadas a los cimientos de mampostería a través de dados de concreto y marcos de carga.



1. nivel de sótano 2. puente de carga 3. cabeza del pilote 4. funda metálica  
 5. fuste del pilote 6. relleno de grasa mineral entre el pilote y la funda  
 7. mezcla de bentonita y cemento alrededor del pilote  
 8. funda deformable de neopreno 9. casquillo metálico  
 10. punta o botón 11. perforación

**Figura 3.11. Pilote con control mecánico y funda.**

El procedimiento constructivo de estos pilotes es muy similar al de los pilotes de control. Primeramente se realiza una perforación, y luego se hincan los tramos del pilote. Este puede poseer una funda de acero, normalmente en tramos de 3 m unidos por medio de camisas de

neopreno que toman las deformaciones provocadas por la consolidación regional. Entre el pilote y la funda existe un relleno de grasa mineral para disminuir la fricción entre ambos elementos; de la misma forma, entre la funda y el suelo de la perforación se coloca, previamente a la hinca, una mezcla de bentonita-cemento con una resistencia al esfuerzo cortante similar a la del suelo circundante, con la finalidad de que la fricción no sea tan significativa (Santoyo y Segovia, 1999).

La técnica ha sido poco aplicada en México. En la Capilla de las Ánimas (detallado en el inciso 4.2.2), se usó para proteger al monumento de la interacción con estructuras vecinas. En este caso no se usaron cubos de madera entre la cabeza del pilote y el puente de reacción. En su lugar se emplearon placas de acero con el objetivo de controlar las deformaciones verticales de la estructura; en este tipo de sistemas de cimentación profunda, el peligro está en que se exceda la capacidad de punta del pilote (o capacidad estructural). En todo caso el éxito de la Capilla es que transmite cargas no demasiado grandes.

Además de lo anterior debe preverse la posibilidad de falla por pandeo. En el caso de la Capilla cuyo peso es de 1000 t, cada pilote recibe aproximadamente la décima parte la cual es cercana a la mitad de la carga de pandeo que se acerca a las 200 t.

Esta es una medida altamente obstructora, tanto a nivel de cimentación como en la superestructura. Por lo demás, es una intervención poco económica, ya que los pilotes deben ser sobredimensionados y la superestructura reforzada, lo que en el caso de preservación del patrimonio, puede que se justifique. A pesar de esto, no es deseable el recurso a esta técnica en la recuperación de monumentos históricos pues contraría muchos de los principios de las Cartas Internacionales de Restauración.

## 3.6. bombeo de agua en sitios selectos

El bombeo de agua es por naturaleza una medida temporaria. Su aplicación se extiende por un período de tiempo limitado y bien definido, pero algunos de sus efectos pueden prevalecer o ser efectivos por mucho tiempo. Con esta técnica se intentan producir asentamientos correctivos, pero también puede servir solamente de apoyo a la construcción de otras obras, o a los trabajos geotécnicos que se realicen en un monumento, en donde el nivel freático es alto.

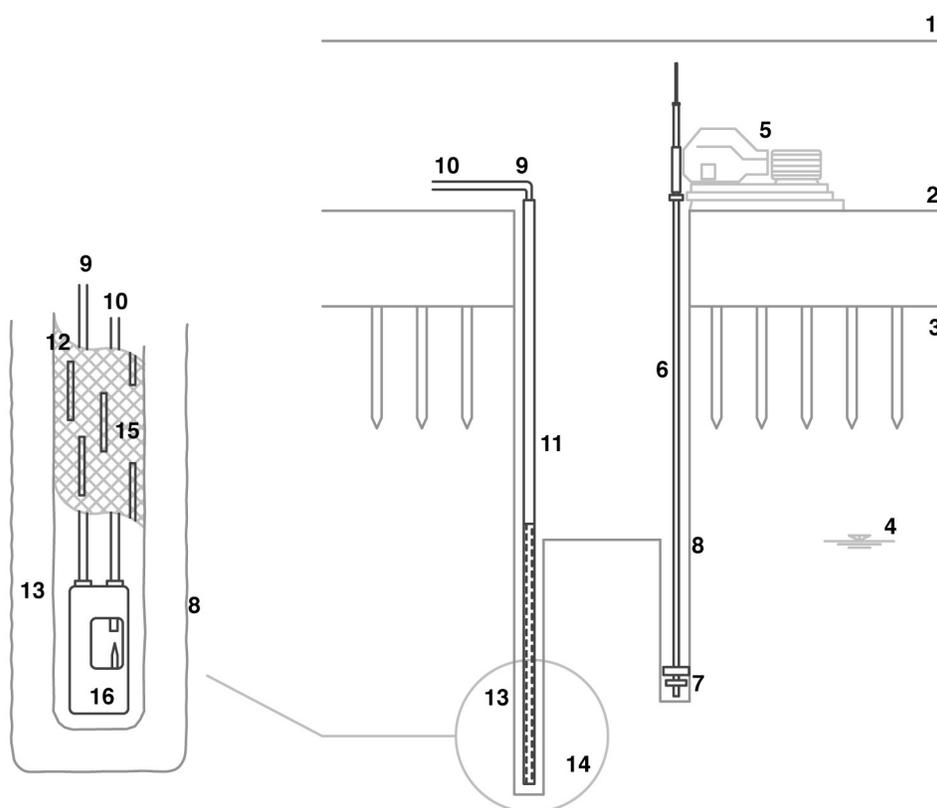
Primeramente se construyen ejes o trincheras desde los cuales se quiera realizar el bombeo de agua (Fig. 3.12). Luego se instala un sistema de pozos eyectores en el fondo de los ejes, los cuales son mantenidos en operación durante los trabajos o por el tiempo necesario.

El bombeo produce asentamientos y, consecuentemente, la secuencia de operación debe ser diseñada para que produzca deformaciones correctivas en la edificación monumental (Santoyo et al, 2005). Las arcillas que puedan sufrir deformaciones de gran magnitud en procesos de consolidación, como consecuencia de la disminución de su contenido de agua, provocado en este caso por el bombeo, se deben estudiar a fondo, ya que esta medida, aún cuando temporal o de apoyo, inducirá asentamientos adicionales a la construcción.

La técnica se usó como apoyo a la subexcavación en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México (Fig. 2.14), en donde se realizó el bombeo de agua desde el fondo de los ejes de la

subexcavación, con el fin de construir en condiciones secas (Santoyo et al, 2005). Como medida usada intencionalmente para corregir los asentamientos diferenciales se ha usado muy poco y los resultados no han sido conclusivos.

Como ya se ha probado en varias ocasiones, la medida es efectiva. Aunque sea más lenta que otras intervenciones posibles y que los asentamientos o velocidades de las deformaciones provocadas no se puedan regular con suficiente precisión, es una medida que no afecta el uso del inmueble y tampoco destruye el patrimonio edificado o enterrado, por lo que su uso más generalizado sería de “muy buen gusto”.



- 1. nivel del piso del edificio 2. nivel del sótano 3. cimentación 4. nivel freático
- 5. perforadora 6. barras de perforación 7. broca de aletas
- 8. perforación 9. tubería de inyección 10. tubería de descarga
- 11. ademe liso 12. ademe ranurado 13. filtro de gravilla
- 14. pozo de bombeo terminado 15. malla plástica 16. punta eyectora

**Figura 3.12. Pozo de bombeo, como usado en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México.**

En suelos arcillosos, debido a su característica de baja permeabilidad, las deformaciones en el subsuelo debidas al bombeo, así como a la inyección local de agua descrita en el inciso a continuación, son difíciles de predecir, estimar y controlar con suficiente precisión. Consecuentemente, todavía no se puede confiar en estos métodos cuando usados en nivelación

de edificios, y mucho menos en caso de monumentos históricos porque son construcciones que muchas veces no admiten esperas o entrenamientos de soluciones.

### 3.7. inyección local de agua

La técnica de inyección de agua en el subsuelo es un medio temporal para renivelar edificios, ya que con ella se reducen los hundimientos diferenciales en las estructuras. Con la inyección de agua al suelo subyacente a la estructura, se recupera la presión hidrostática a través de la anulación del abatimiento de dicha presión, por lo que se puede considerar como medida correctiva. En la ciudad de México, las aplicaciones de la técnica de inyección de agua en el subsuelo tienen por objeto restaurar la presión de poro selectivamente en sitios que sufren los efectos de la consolidación regional (Santoyo et al, 2005).

En la década de 70 del siglo pasado, el ingeniero mexicano Gabriel Moreno Pecero ensayó el método para reducir hundimientos diferenciales en monumentos históricos, introduciendo pequeños gastos de agua en los lentes permeables del subsuelo (Santoyo et al, 2005). Esquemáticamente es muy similar a la solución anterior, bombeo de agua, solo que aquí los pozos son de inyección (Fig. 3.12).

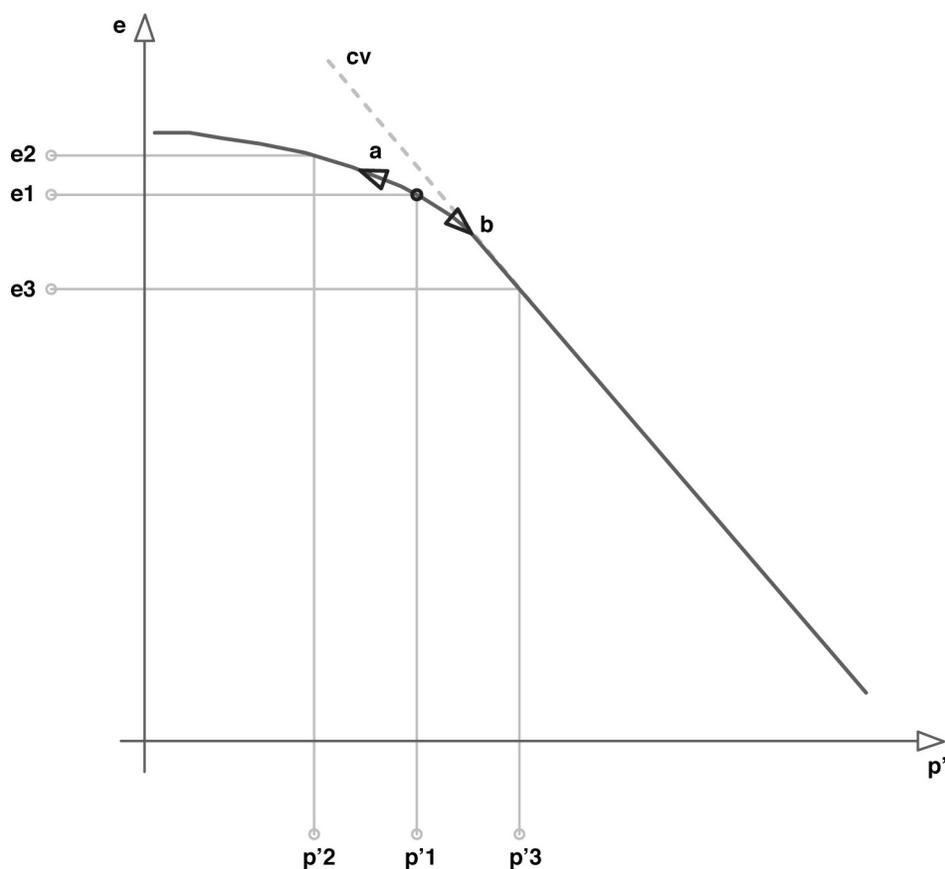
Los asentamientos correctivos inducidos con la inyección de agua en el subsuelo son difíciles de controlar, tanto que Moreno Pecero consideró que los resultados eran alentadores para, solamente enunciar *“la posibilidad futura de que este método pueda ser implementado con el fin de mitigar el hundimiento de los suelos blandos en la ciudad de México”* (Moreno Pecero, 1981).

La primera prueba se realizó en las esquinas nororiental y surponiente del Palacio Nacional (Fig. 2.9) de la ciudad de México, en 1978; la corta duración del experimento sólo permitió que la efectividad del procedimiento quedara parcialmente demostrada. Otros técnicos mexicanos, han realizado trabajos para corregir el comportamiento de edificios con inyección de agua. Uno de ellos es la Casa del Marqués del Apartado, en el centro histórico de la ciudad de México, cuyo desplomo alcanzaba 82 cm en 1984 y se incrementaba a razón de 2.6 cm/año (Santoyo et al, 2005). Hasta el momento no se han publicado los resultados de cualquiera de los trabajos mencionados.

Otro caso importante de infiltración en la ciudad de México fue en la Torre de Relaciones Exteriores en Tlatelolco (Santoyo et al, 2005). Desde su construcción en 1964 se empezó a inclinar; después de varias intervenciones se aumentó el cajón de cimentación en 1987, lo que resultó benéfico para el edificio. Pero los desplomos continuaron y en 1991 el Dr. Germán Figueroa propone inyectar agua al subsuelo, lo que inicialmente fue bastante exitoso, recuperándose 20 cm de inclinación. No obstante, las mediciones posteriores suman las influencias del cajón y de la inyección de agua, por lo que dichas mediciones no han sido consideradas veraces, o demostrativas de que el procedimiento es efectivo (Santoyo et al, 2005).

El Dr. Figueroa propuso un modelo de comportamiento del subsuelo que demuestra que se debe inyectar agua únicamente a la capa dura, a condición de que sea permeable, y cuando esto no se cumple se debe buscar hacerlo en otros estratos permeables. Aún con todo, los asentamientos

son difíciles de estimar debido a la característica de muy baja permeabilidad de las arcillas; estos suelos no dejan que el agua percole o se “mueva” por lo que los efectos, tanto de la inyección como del bombeo, dependen del tiempo en el cual el suelo cambie su contenido de agua (Fig. 3.13). Por lo demás, inyectar agua al subsuelo es un proceso más lento que el bombeo; en la gráfica a continuación se comparan ambos fenómenos en un suelo normalmente consolidado como la arcilla del valle de México.



$p'$ . esfuerzos efectivos  $e$ . relación de vacíos  
**a.** trayectoria de inyección **b.** trayectoria de bombeo  
**cv.** línea de consolidación virgen

**Figura 3.13. Comportamiento de una arcilla sujeta a inyección y bombeo de agua.**

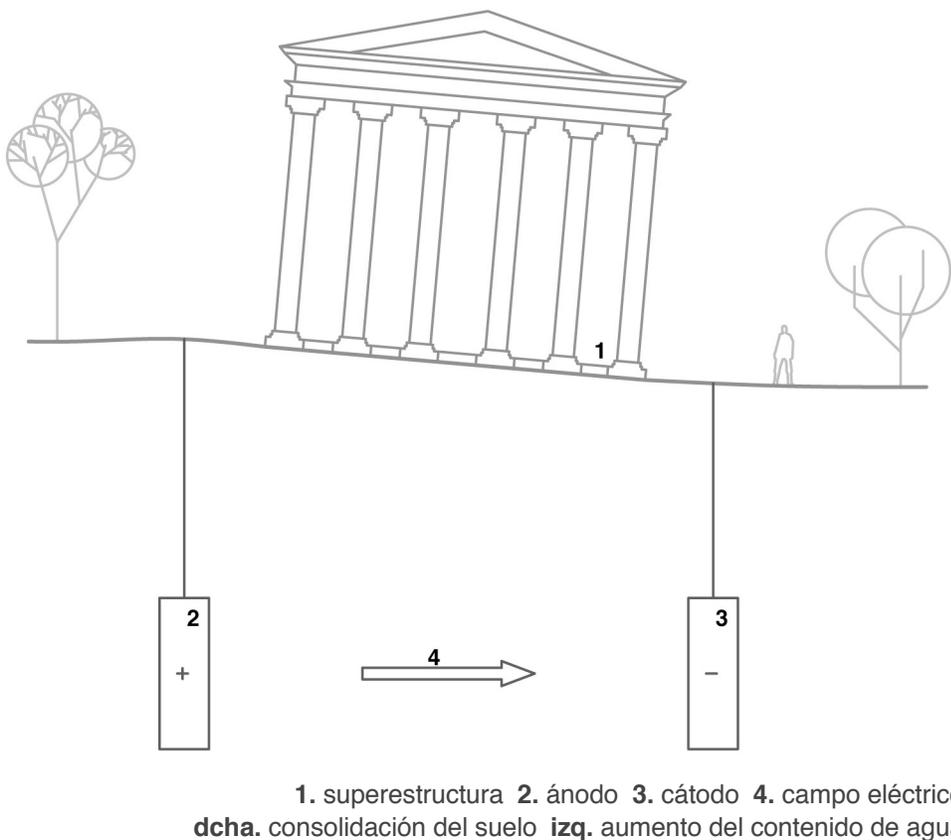
Imagínese que una dada masa de suelo se encuentra, en su estado natural, sujeta a un esfuerzo efectivo  $p'1$  y posee una relación de vacíos  $e1$  (Fig. 3.13). Si se inyecta agua al suelo, los esfuerzos efectivos disminuyen hasta  $p'2$  (el suelo sigue la trayectoria a), y el aumento de la relación de vacíos correspondiente es la diferencia entre  $e1$  y  $e2$ ; por el contrario, si se bombea agua del suelo, los esfuerzos efectivos aumentan hasta  $p'3$ , y la relación de vacíos disminuye para  $e3$ . En la gráfica es bien visible que la inyección de agua, para una dada diferencia de esfuerzos efectivos (la diferencia entre  $p'1$  y  $p'2$  o  $p'3$  es igual), produce un cambio de la relación

de vacíos mucho menor que el bombeo. Con ésto se explica porqué la inyección es un proceso mucho menos efectivo que el bombeo de agua en masas arcillosas normalmente consolidadas o ligeramente preconsolidadas, como es el caso de la arcilla de la ciudad de México.

Moreno Pecero decía que el método se realizaba “a través de inyecciones a alta presión de pequeñas cantidades de agua”, y además, “agua que puede ser obtenida del mismo suelo”, lo que parece ser la solución perfecta. Desafortunadamente, el hecho de que existan pocas mediciones no ha permitido llegar a una crítica positiva en relación a esta técnica.

### 3.8. electro-osmosis

La electro-osmosis es, por naturaleza, una medida temporal, y se lleva a cabo para inducir el flujo de agua y cambios en los esfuerzos efectivos del subsuelo, y por ende, asentamientos correctivos en la construcción. Su aplicación se extiende por un período de tiempo limitado y bien definido, pero algunos de sus efectos pueden prevalecer o ser efectivos por mucho tiempo.



**Figura 3.14. Principio de la electro-osmosis.**

Este método consiste en colocar electrodos (ánodos y cátodos) dentro del terreno, separados a una cierta distancia (Fig. 3.14). Al energizarlos se produce una corriente eléctrica que induce el flujo del agua contenida en los poros del suelo, desde el polo positivo al negativo. Este flujo produce una consolidación en la zona de donde emigra el agua y, consecuentemente una compresión del subsuelo. En concomitancia con la inducción de un campo eléctrico se puede usar la extracción del agua desde el subsuelo, es decir un bombeo electrosmótico.

La técnica de la electro-ósmosis o del bombeo electrosmótico son difíciles de controlar. Además, como consecuencia de la intensidad de corriente, los ánodos tienen una duración corta, debido al elevado grado de corrosión; por otro, el exceso de presión de poro negativa en los ánodos es acompañado por el desarrollo de presión de poro positiva en los cátodos. También, los fenómenos secundarios, como el incremento de temperatura y la generación de gas suelen ser muy significativos (Jamiolkowski et al, 1999). Finalmente, la cantidad de fluido removido no es suficiente para inducir un asentamiento significativo en la superficie, el cual a su vez es de determinación ardua.

La técnica fue usada experimentalmente en la Torre de Pisa (explicado en el punto 4.4) durante un año, pero fue abandonada debido a las desventajas mencionadas (Jamiolkowski et al, 1999). Como ejemplos en la Ciudad de México hay varios en los años 70; de la misma manera, los resultados no fueron satisfactorios (Santoyo et al, 2005).

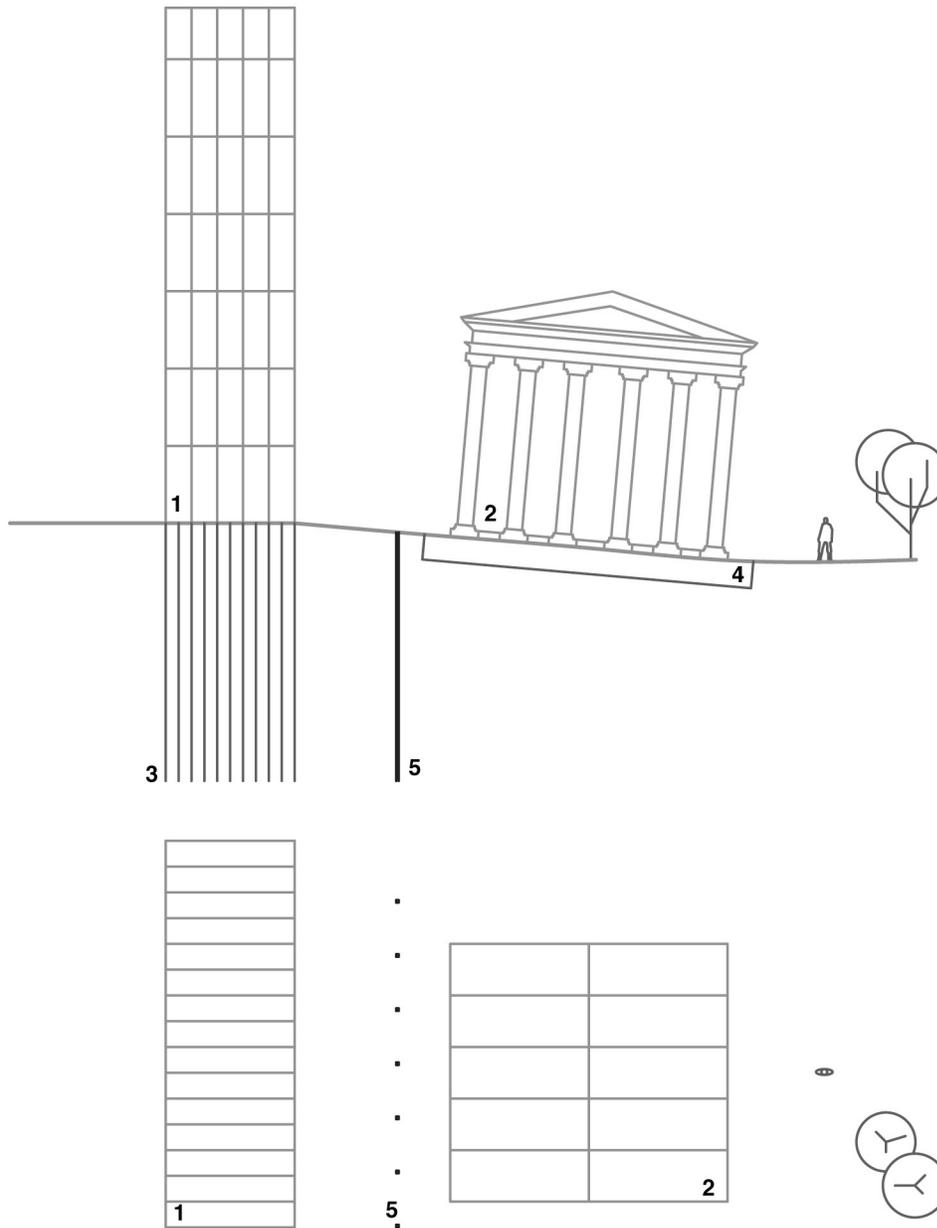
La técnica de la electro-osmosis o del bombeo electrosmótico ha sido experimentada varias veces en diversas partes del mundo y en algunos monumentos históricos. Las conclusiones, a grandes rasgos, son que el procedimiento no se logra controlar con la precisión o eficacia deseada, además de que posee desventajas importantes todavía no superadas por los desarrollos técnicos o científicos. No obstante, el procedimiento de intervención y los principios del método conllevan a una solución muy respetuosa de los edificios históricos.

### 3.9. aislamiento o separación por trincheras

Muchas veces se requiere que un monumento funcione independientemente de las demás construcciones por la influencia nociva de discontinuidades o esfuerzos inducidos sobre aquél, como son las construcciones colindantes o las infraestructuras urbanas. Una de las soluciones por medio de la cual se puede aislar un edificio monumental de lo contiguo es la creación de una pantalla antifriccionante, o sea de un plano de baja resistencia. La medida tiene carácter temporal.

La forma de implementar la técnica consiste en el aislamiento estructural por medio de un barreno de precorte, en una primera instancia, y luego en la realización de una pantalla antifriccionante (Fig. 3.15). Para la formación del barreno de precorte, se hacen perforaciones con una distancia dada, a lo largo de la longitud del muro de la edificación, hasta una profundidad que se considere adecuada; luego se colocan tubos de PVC, con perforaciones laterales a cada metro, y con válvulas de manguito (Fig. 3.16). Para formar un plano vertical de debilidad, se inyecta agua a presión, o un gel polimérico de muy baja resistencia, lo que permitirá a las estructuras vecinas desplazarse verticalmente sin transmitir esfuerzos cortantes al monumento en protección.

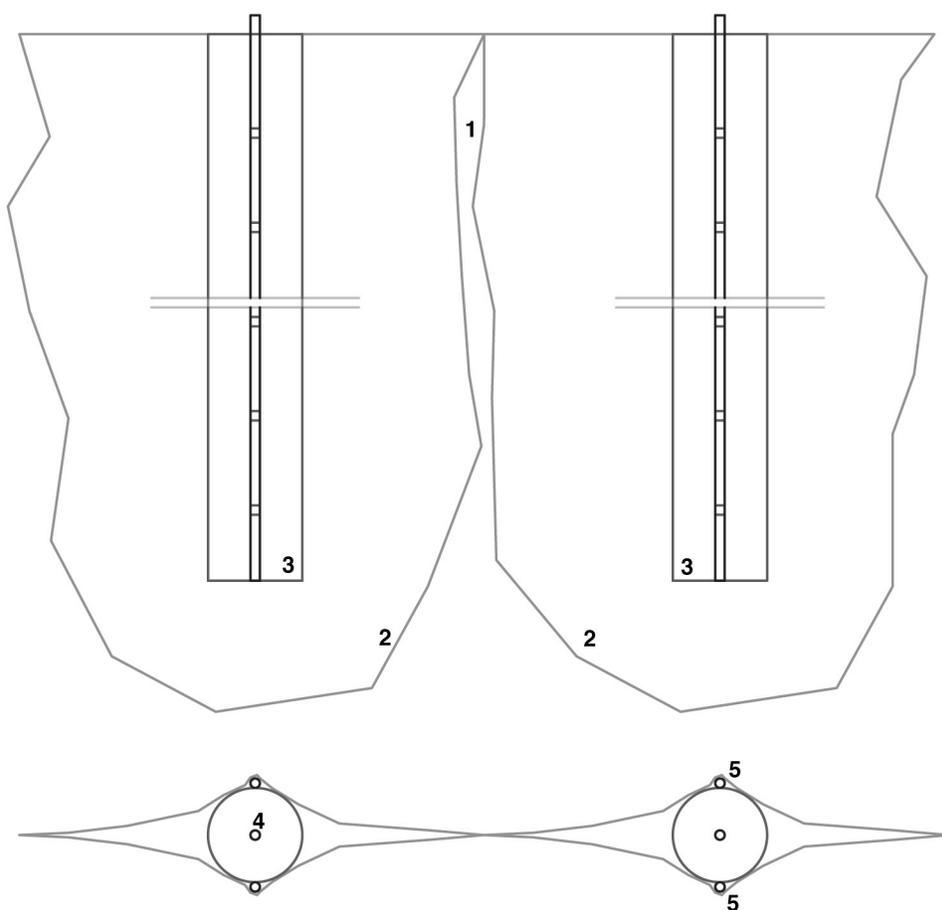
La orientación de ese plano queda determinada por el estado de esfuerzos que existe en el suelo, considerando el efecto de estructuras adyacentes; para mantenerlo es necesario que periódicamente se realice la inyección de agua.



1. edificio reciente 2. edificio antiguo 3. cimentación del edificio reciente  
4. cimentación del edificio antiguo 5. pantalla antifriccionante

**Figura 3.15. Esquema de uso de un plano de baja resistencia.**

Este método fue usado en la Capilla de las Ánimas (inciso 4.2.2), en la Casa de los Azulejos (descrito en 4.2.4) y en el Templo de Corpus Christi (detallado en 4.2.5), en la Ciudad de México. Los resultados todavía están siendo evaluados.



1. masa de suelo 2. pantalla antifriccionante 3. geotextil 4. tubo para expansión radial del núcleo de la pantalla antifriccionante 5. tubo de manquito para inyección lateral

**Figura 3.16. Detalle de un plano de baja resistencia.**

La creación de un plano de baja resistencia respeta enteramente a los monumentos, además de que es una medida no-obstructora. En locales sujetos a fenómenos de hundimiento regional, y en donde las construcciones lindantes afecten a la construcción histórica, se puede afirmar que esta es una muy buena solución.

## 3.10. mejoramiento del suelo

Las técnicas de mejoramiento del suelo son varias y poseen carácter permanente o temporal. Existen muchos factores en proyectos de construcción que incrementan el riesgo de falla de la cimentación o producen asentamientos inadmisibles debido a la baja resistencia, alta compresibilidad y baja permeabilidad de los suelos. Así los procedimientos para el mejoramiento del suelo generalmente se refieren a medidas para cambiar algunas de estas propiedades (restituir, compensar).

Una de las técnicas para mejorar los suelos arenosos es el Jet-Grout, de origen japonés; una vertiente de esta técnica es el Deep Mixing. Para suelos arenosos o arcillosos, la congelación del suelo es una solución con utilidad constructiva, ya que se usa para el sostenimiento temporal de excavaciones; asimismo es de gran utilidad en casos muy particulares, o como auxilio a otra solución. En suelos arcillosos está en boga la técnica de fracturamiento hidráulico que consiste en instalar tubos especiales de inyección en el suelo de cimentación, con válvulas a diferentes profundidades; se repiten en etapas sucesivas las inyecciones de mezclas de cemento y bentonita, con el fin de obtener un incremento progresivo de las características mecánicas.

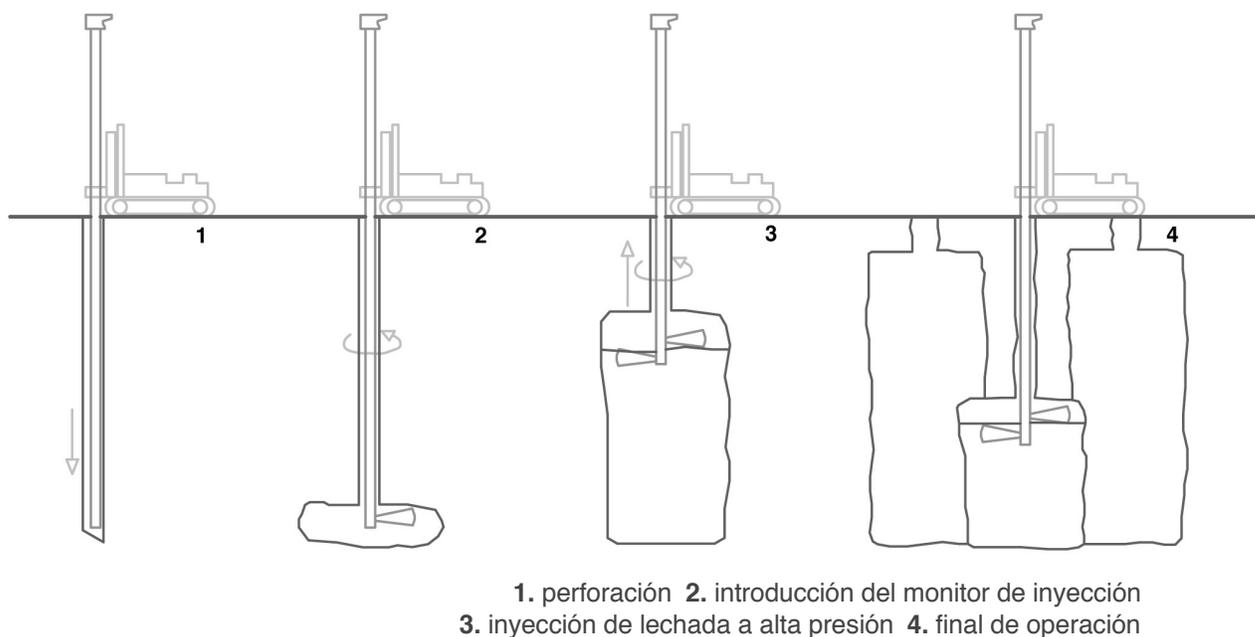
A pesar de las muchas ventajas que poseen las técnicas de mejoramiento del subsuelo, muchas veces son difíciles de implementar. También, debido a que implican intervención en el subsuelo, pueden dañar estructuras enterradas, como los depósitos arqueológicos ricos.

### 3.10.1. jet-grout y deep-mixing

Tanto el Jet-Grout como el Deep-Mixing, son tratamientos del suelo realizados in situ con materiales a base de cemento. Ambos tienen múltiples aplicaciones como la mejora del terreno, la impermeabilización, etc. (Corko et al, 2004). El fluido de perforación es variable (cemento, bentonita, mezclas químicas).

Ambas técnicas se desarrollan en dos fases (Fig. 3.17): en primer lugar se perfora hasta la cota final; luego, se inyecta el fluido y, simultáneamente, se recupera la tubería. Las presiones de inyección son elevadas. Las variables de ejecución son la presión y cantidad del fluido, la velocidad de rotación y la de avance; el radio final de la inyección dependerá de dichas variables y de las características geotécnicas del terreno (Corko et al, 2004).

Las aplicaciones de las técnicas mencionadas son controlar el agua en el suelo, soportar excavaciones, estabilizar suelos y cimentaciones, mitigar la licuefacción, reducir vibraciones, fijar contaminantes, etc. (Van Tol, 2004). A pesar de tan larga aplicación, existen barreras como la inexperiencia de los constructores, la definición de variables y verificación, y el costo.



**Figura 3.17. Procedimiento constructivo del Get-Grout y Deep-Mixing.**



En trabajos adyacentes a construcciones históricas estas técnicas son de gran utilidad. De hecho existen algunas obras arquitectónicas que usan estas técnicas acompañadas de un adecuado diseño.

**Figura 3.18. Muro de retención con técnicas de Deep-Mixing.**

No se han aplicado en monumentos históricos, pero como medida de apoyo hay algunos casos en el mundo. Siempre y cuando la intervención no destruya el testigo histórico invisible del monumento se considera aceptable ya que lo protege de interacciones mayores provocadas por trabajos en los alrededores de la edificación.

### 3.10.2. congelamiento del suelo

El proceso de congelamiento del suelo se realiza por la circulación de un líquido refrigerador a lo largo de series de tubos insertados en el subsuelo, con el fin de convertir el agua del suelo en hielo, creando un material hermético y con elevada resistencia (Besson, 2004). Después de completada la refrigeración inicial, la capacidad de refrigeración necesaria para mantener congelada la barrera es muy reducida.



El congelamiento de agua es una técnica que está en creciente utilización en la construcción ingenieril.

**Figura 3.19. Congelamiento del suelo.**

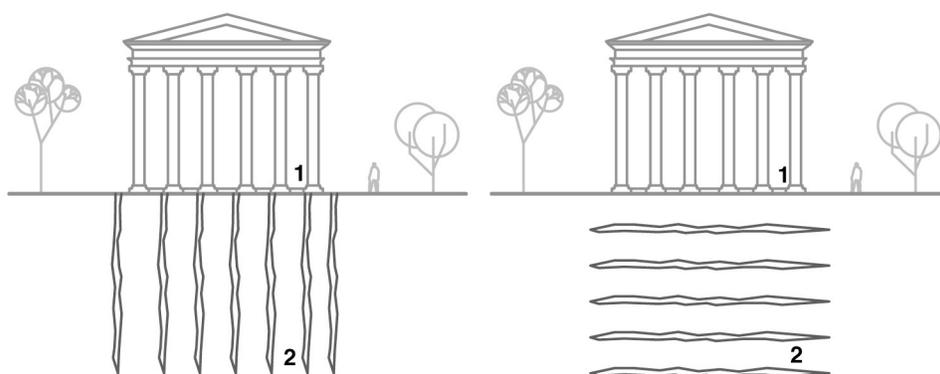
La técnica de congelamiento del suelo se usó en la Torre de Pisa (como se detalla en 4.4) para prevenir el flujo del agua, cuando se decidió sustituir el lastre por 10 anclas en el suelo que subyace a la arcilla Pancone, una arena firme (Jamiolkowski et al, 1999). La medida tuvo consecuencias nocivas para el monumento ya que, cuando se congela el suelo existe una

expansión de las partículas de agua; después de descongelar se crean fisuras y grietas irreversibles en la arcilla, cambiando sobremanera su resistencia. En las arcillas de la ciudad de México se realizaron experimentos pero también con resultados negativos: después de descongelar el suelo, la arcilla presentó importante grado de remoldeo.

Con las lecciones de varios casos de aplicación de la técnica de congelamiento se puede inferir que no es aplicable a todos los tipos de suelos; asimismo, es fundamental un estudio detallado de las condiciones geotécnicas en el sitio, y en caso de duda es imprescindible una prueba a menor escala para concluir con seguridad en relación a los efectos futuros de una intervención de este tipo.

### 3.10.3. inyección de morteros por fracturamiento hidráulico en suelos blandos

La intención general es lograr una distribución de asentamientos más uniforme o de campo de deformación vertical. Las inyecciones por fracturamiento hidráulico tienen como fin reforzar el suelo; la masa queda compuesta por el material original intercalado de delgados estratos de mortero (Fig. 3.20). El conjunto es una estructura injertada a la masa de suelo que se comporta como una estructura compuesta, con deformabilidad menor que la original de la arcilla (Santoyo et al, 2005).



1. edificio a intervenir 2. láminas de mortero

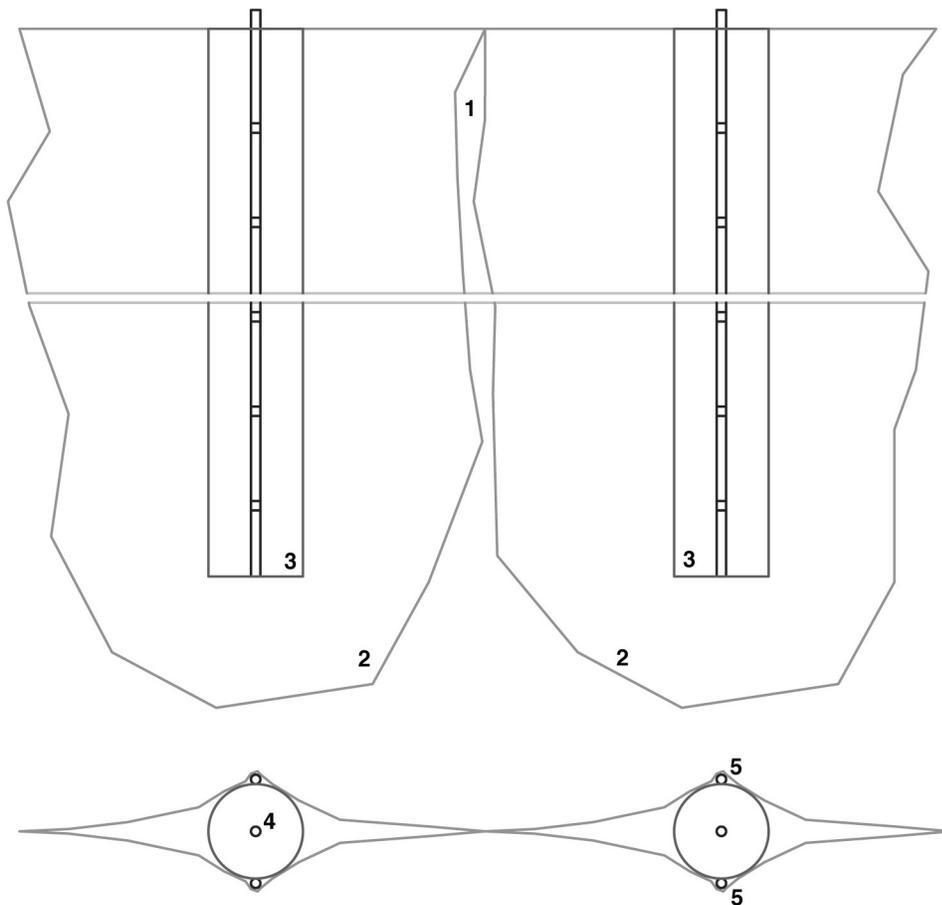
**Figura 3.20. Láminas de mortero verticales (izquierda) y horizontales (derecha).**

El procedimiento constructivo consiste en la formación de núcleos de mortero de diámetro y longitud adecuados; se realizan inyecciones laterales en tubos de manguitos que inducen fracturamiento hidráulico en el suelo para formar láminas de refuerzo en la cercanía del núcleo de mortero. Este procedimiento genera una estructura integrada por los núcleos de mortero y láminas laterales de refuerzo vertical (Fig. 3.21), u horizontal (Fig. 3.22), dependiendo del estado de esfuerzos presente en la masa de suelo, que quedan íntimamente integradas en dicha masa.

En México, por ejemplo, así como en muchos otros locales en los que existen arcillas jóvenes, estas se encuentran normalmente consolidadas por lo que el esfuerzo vertical es mayor que el

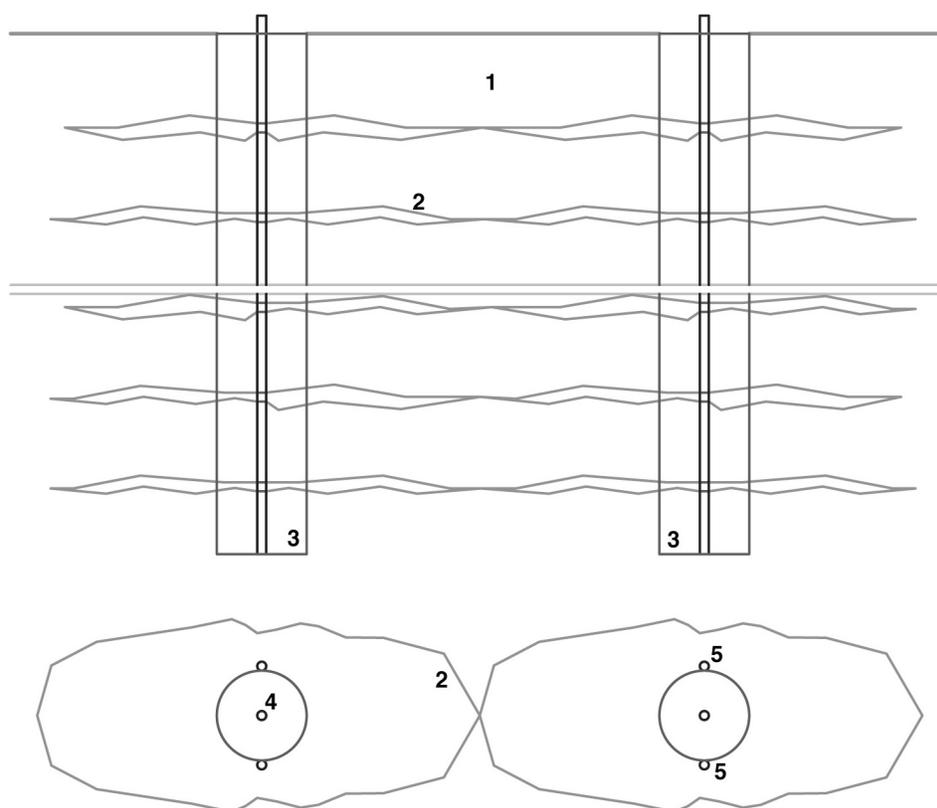
horizontal; cuando se inyecta mortero a presión, este se expande en dirección horizontal pues es donde recibe menos “impedimento” (Fig. 3.21). Por el contrario, en suelo antiguos, como en las arcillas de Londres sujetas a procesos de desglaciación, el esfuerzo horizontal es muy superior al vertical; así, cuando se inyecta mortero a presión este se expande verticalmente, formando láminas horizontales (Fig. 3.22).

La inclusión de morteros se suele llevar a cabo por etapas; después de cada una se debe evaluar el comportamiento del monumento, con base en resultados de nivelaciones topográficas, de mediciones de desplomo y de abertura o cerramiento de grietas y fisuras que periódicamente se deben llevar a cabo. Los resultados de estas mediciones permiten establecer la necesidad de hacer inyecciones posteriores, de acuerdo con el comportamiento observado, es decir con base en la aplicación del Método Observacional, que se describirá en el capítulo quinto.



- 1. masa de suelo
- 2. lámina de mortero
- 3. geotextil
- 4. tubo para expansión radial del núcleo de la lámina de mortero
- 5. tubo de manguito para inyección lateral

**Figura 3.21. Mortero vertical.**



1. masa de suelo 2. lámina de mortero 3. geotextil  
 4. tubo para expansión radial del núcleo de la lámina de mortero  
 5. tubo de manguito para inyección lateral

**Figura 3.22. Mortero horizontal.**

La técnica fue aplicada en el Palacio de Bellas Artes, en la ciudad de México, entre 1910 y 1925. En ese entonces se consideró como un fracaso pues no se emprendió el fracturamiento del subsuelo por la carencia del conocimiento teórico. En estudios recientes se demostró que esta técnica permite endurecer selectivamente el suelo por lo cual se ha usado en varios monumentos históricos con buen resultado, como en la Catedral Metropolitana (descrito en 4.2.1) y en la iglesia de San Agustín (detallado en 4.2.3) en la Ciudad de México. En el Big Ben de Londres (relatado en el inciso 4.7) se aplicó la inyección con la filosofía de una técnica de nivelación del edificio que iba ser sometido a esfuerzos impuestos por la construcción de una nueva estación del Underground.

### 3.11. inclusiones rígidas

La construcción de estructuras sobre plataformas de tierra, reforzadas con pilotes, generalmente de madera (estacas), es una vieja técnica para reforzar suelos blandos. En México, por ejemplo,

existen vestigios de estacas de cimentación (Fig. 3.23), hincadas para eliminar la deformabilidad del fango del lago de Texcoco, tanto en las construcciones Aztecas (desde 1325), como del período colonial (siglos XVI a XVIII) o Porfirista (finales del siglo XIX e inicio del siglo XX) (Santoyo, Ovando y Segovia, 1999). Asimismo, además de las consideraciones de capacidad de carga, los constructores de la antigüedad ya tenían la noción de que las deformaciones del subsuelo y sus efectos en la estructura también podían gobernar el diseño.

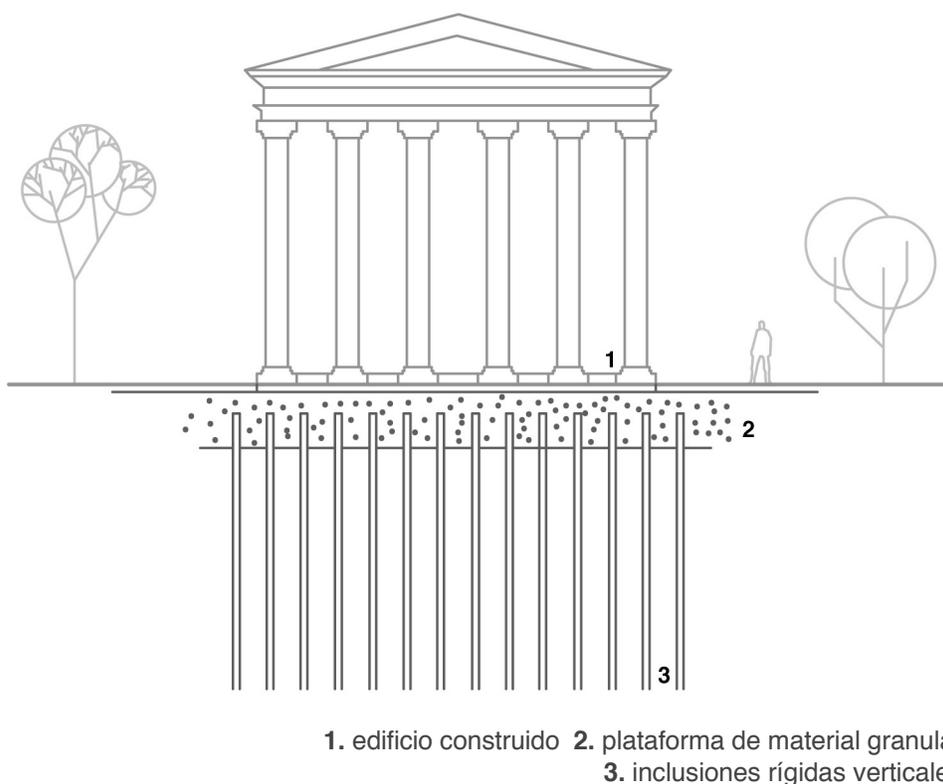


Vestigios de estacones de madera como prueba de la vieja técnica para cimentar edificios.

**Figura 3.23. Cimentación del Palacio de Minería en la ciudad de México, México.**

Una inclusión es un elemento colocado en el subsuelo, con resistencia y rigidez distinta a la del suelo, sin que se una estructuralmente a la cimentación del edificio; con ella se puede cambiar la resistencia del suelo, la del sistema suelo-cimentación (es decir, capacidad de carga de la cimentación), o la deformabilidad del suelo (o sea, asentamientos de la estructura). Colocando inclusiones rígidas en el subsuelo se logra la reducción de los asentamientos totales y diferenciales, así como el incremento de la capacidad de carga del subsuelo, sin tener que reforzar la superestructura o adoptar métodos tradicionales de mejoramiento del suelo, los cuales requieren de un período de construcción mucho más amplio (Auvinet y Rodríguez, 2006).

Los principales elementos (Fig. 3.24) de la técnica son: superiormente, una plataforma de material granular, que asegura la transferencia de la carga de la superestructura a la cabeza de las inclusiones; le siguen las inclusiones rígidas verticales que transfieren dichas cargas a materiales más profundos y menos compresibles.



**Figura 3.24. Inclusiones rígidas.**

La técnica de inclusiones rígidas puede ser difícil de implementar y es casi siempre un método obstructor. Por lo demás, el método posee ventajas económicas cuando se compara con métodos tradicionales de pilotes reforzados y conectados a la estructura. La experiencia en cuanto a la aplicación de esta técnica ha aumentado mucho y, de la misma forma, se han desarrollado modelos analíticos y numéricos, para su mejor aplicación (Luna González y Auvinet Guichard, 2006).

Las inclusiones rígidas no han sido probadas en monumentos arquitectónicos, aunque muchas construcciones monumentales esparcidas por todo el mundo han sido cimentadas sobre esta antigua técnica de inclusiones.

Conviene mencionar que, la aplicación de las inclusiones rígidas en suelos blandos, como los de la ciudad de México, actualmente está limitada a construcciones ligeras y medianas. Para estructuras mayores, aparecen problemas como la capacidad de carga y el comportamiento sísmico, por lo que se necesitan más estudios sobre el tema (Luna González y Auvinet Guichard, 2006). Por lo demás, no existe un número suficiente de casos instrumentados, y tampoco existe un método de diseño; asimismo urge la elaboración de normas que orienten a los diseñadores y constructores para la aplicación de esta técnica anciana y ahora retomada de nuestros antepasados.

### 3.12. comentarios finales

Algunas de las soluciones mencionadas en los incisos precedentes son correctivas, otras preventivas y otras se pueden incluir en ambas categorías. La subexcavación o el lastre se pueden considerar como correctivas; las técnicas de mejoramiento del suelo, las inclusiones rígidas o el aislamiento de estructuras se incluyen en las preventivas; todas las demás, se pueden tomar como medida de corrección o de prevención.

Una solución correctiva no necesariamente elimina las causas, sino que tiene como fin detener o mitigar los efectos de los asentamientos diferenciales, como desplomos o daños estructurales. Este tipo de medidas son necesarias cuando existen factores desconocidos que pueden modificar las condiciones en el sitio, como la pérdida de agua desde cisternas, tuberías de suministro, en caso de remoción o introducción de árboles, etc.

A su vez, las soluciones preventivas tienen la intención de prevenir los efectos nocivos de los asentamientos diferenciales o daños futuros acumulados. Estas pueden ser aplicadas cuando las condiciones en el sitio son, de alguna forma, modificadas, por ejemplo por cortes cercanos, excavaciones, construcción de túneles, etc. En muchos casos, la elección de estas medidas también implica la eliminación del factor de origen. Debe notarse que en el tratamiento de los peligros sísmicos, se deben buscar medidas preventivas a la vez de correctivas.

Las tablas presentadas a continuación resumen las medidas para prevenir y corregir los efectos nocivos de los asentamientos diferenciales. La división adoptada es basada en algunos proyectos de restauración de monumentos, sin embargo, como ya mencionado, la mayoría de las medidas descritas en este capítulo se pueden incluir en ambos, prevención y corrección, dependiendo de lo previsto en el proyecto.

método	ventajas/desventajas	ejemplos
rehabilitación de los elementos originales de la cimentación	usado para restaurar o mejorar la condición de la cimentación existente efectivo, dependiendo de la adecuada identificación del factor de origen y del buen conocimiento de las condiciones geotécnicas puede o no ser obstructora	ha sido usado en muchos monumentos y edificios históricos en todo el mundo
aislamiento o separación por trincheras	las trincheras pueden ser usadas para separar o aislar los desplazamientos de campo de dos o más estructuras	Capilla de las Ánimas, Casa de los Azulejos y antiguo templo de Corpus Christi (México)
jet-grouting	puede ser difícil de implementar puede o no ser obstructora	no probada en monumentos históricos
deep mixing	puede ser difícil de implementar puede o no ser obstructora	no probada en monumentos históricos
inyección de morteros por fracturamiento hidráulico	logra una distribución de asentamientos más uniforme o de campo de deformación vertical puede ser difícil de implementar puede o no ser obstructora	Catedral Metropolitana e iglesia de San Agustín (México)
inclusiones rígidas	logra una distribución de asentamientos más uniforme o de campo de deformación vertical no son conectadas a la estructura puede ser difícil de implementar medida obstructora	no probado en monumentos históricos muchos proyectos han sido llevados a cabo en estructuras antiguas de la Ciudad de México

**Tabla 3.1. Medidas para prevenir los efectos nocivos de los asentamientos diferenciales.**

<b>método</b>	<b>ventajas/desventajas</b>	<b>ejemplos</b>
lastre	los contrapesos pueden mejorar la respuesta sísmica de la edificación no obstructora estéticamente inadecuado	muchos monumentos históricos en todo el mundo Torre de Pisa como medida temporal
subexcavación	la velocidad de los asentamientos correctivos puede ser controlada adaptable a una larga variedad de condiciones puede o no ser obstructora los efectos pueden ser difíciles de predecir o estimar, por lo que se asienta mucho en el Método Observacional puede requerir trabajos auxiliares (trincheras, pozos) o equipamiento de perforación especial	el caso más antiguo documentado data de 1835 (el Campanario de St. Chad en el Reino Unido) Torre de Pisa Catedral Metropolitana de la ciudad de México
inyección local de agua	intención de restaurar la presión de poro en localizaciones selectas en sitios que sufren consolidación regional los asentamientos correctivos inducidos son difíciles de controlar	usado experimentalmente en el Palacio Nacional de la Ciudad de México (1978) y en una casa de finales del siglo XVII (1984) los resultados hasta la fecha no son conclusivos
bombeo de agua	apoyo a obras u otros trabajos geotécnicos conocer bien el subsuelo ya que induce cambios en el contenido de agua no obstructora	no existen casos usados intencionalmente en la restauración, pero hay muchos como apoyo a otras obras
electro-osmosis	llevado a cabo para inducir el flujo de agua y cambios en los esfuerzos efectivos y, por lo tanto, asentamientos correctivos duración corta de los ánodos fenómenos secundarios significativos difícil de controlar	intentado y abandonado en la ciudad de México en los setentas usado experimentalmente en la Torre de Pisa

*continua en la página siguiente*

<b>método</b>	<b>ventajas/desventajas</b>	<b>ejemplos</b>
elementos de cimentación profunda	<p>las condiciones geotécnicas muy especiales y específicas deben de ser conocidas, por ejemplo en sitios sujetos al hundimiento regional</p> <p>requiere de modificaciones estructurales significativas en el sistema de cimentación del monumento</p> <p>la superestructura tiene que ser adaptada y/o reforzada para tolerar los movimientos impuestos</p> <p>puede alterar, dañar o destruir completamente al sub-patrimonio existente</p>	
micropilotes	puede eliminar el factor de origen dando lugar a asentamientos diferenciales	muchos monumentos históricos en todo el mundo
pilotes de control	<p>pilotes conectados indirectamente al edificio por medio de un marco</p> <p>puede ser usado para regular cargas aplicadas en la cabeza de los pilotes o a los asentamientos directamente</p>	<p>desarrollado en 1950 en la ciudad de México</p> <p>usado en muchos monumentos, pero con poco éxito</p>
pilotes con control mecánico y funda	<p>los pilotes deben primero ser instalados o colados en el lugar</p> <p>la velocidad y magnitud del desplazamiento vertical correctivo puede ser controlado con precisión</p> <p>puede eliminar el factor de origen dando lugar a asentamientos diferenciales</p>	ha sido aplicado con poco éxito en la ciudad de México

**Tabla 3.2. Medidas para corregir los efectos nocivos de los asentamientos diferenciales.**

## casos historia



La arquitectura religiosa de la Europa primitiva se caracteriza por el megalitismo. Aunque el Stonehenge se ha reformado una y otra vez desde su fundación, en torno al 2700 a.C., hasta su última fase en el 1500 a.C., sigue hermosamente en pie y fiel a su historia. Este es un buen ejemplo de plena y noble conservación de monumentos.

**Figura 4.1. Círculo mágico de Stonehenge, Inglaterra.**

## 4.1. consideraciones iniciales

Los casos historia descritos a continuación deben su mención a las particularidades geotécnicas que los ingenieros enfrentaron en cada uno de ellos. Las construcciones históricas se ubican en la ciudad de México, Venecia, Pisa, entre otras; en cada ejemplo se discuten problemas y soluciones importantes en términos de la geotecnia aplicada a la restauración de monumentos.

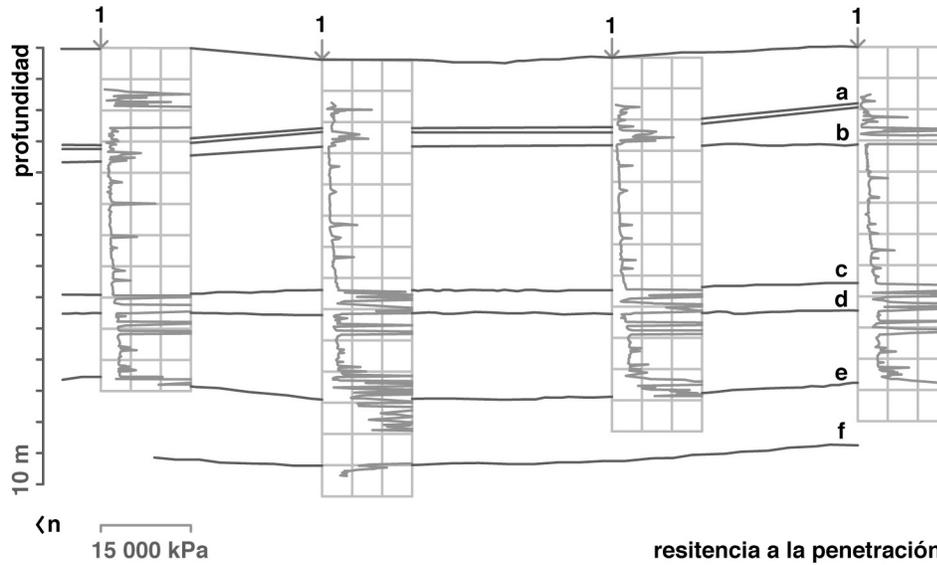
La ciudad de México con su subsuelo tan particular, su sismicidad, y con una gran cantidad de verdaderas reliquias de la arquitectura monumental, es fuente de soluciones bastante novedosas. También Venecia, la ciudad sobre el agua, por su interminable herencia histórica, es considerada como un enorme monumento; las características del subsuelo, el tipo de cimentaciones usadas y la interacción suelo-estructura, constituyen los principales orígenes de los inmensos problemas geotécnicos, así como la voluntad de mejorar en las soluciones aplicadas.

De entre las demás ciudades mencionadas, el caso más conocido es indubitadamente la Torre de Pisa. Por variadas razones, es esencial, preservar su carácter, enigmática historia y trabajo artístico humano. Asimismo, las intervenciones en este monumento tuvieron que ser las mínimas posibles.

El muro romano de Hertogenbosch es mencionado por el particular problema que sufre (no siempre asistimos a un monumento en deterioro debido casi solamente al agua), y por la respetuosa solución que adoptaron los holandeses (mantener el ecosistema). El templo Bayon, patrimonio de la humanidad, se describe por pertenecer a una zona arqueológica de gran importancia, y porque el problema es muy usual (cambio de los elementos estructurales del edificio) y la solución es muy apropiada (rehabilitación de los elementos originales de la cimentación). El Big Ben corría riesgos de estabilidad debido a un usual problema en grandes centros urbanos e históricos a la vez (interferencias debido a la infraestructura urbana), y porque la solución (inyección de morteros en suelos blandos), a pesar de igual a la que se usa en México, funciona de manera distinta. El caso de la torre de Sant Chad se detalla porque es el primer ejemplo de una subexcavación conocido en el mundo, antecedente importante de la técnica que luego se empleó en la Catedral Metropolitana de México y en la Torre de Pisa, entre otras construcciones monumentales.

## 4.2. ciudad de México, México

La secuencia de suelos típica en el centro histórico de la ciudad, esquematizada en la Figura 4.2 y descrita en la Tabla 4.1, se basa en varios estudios para proyectos geotécnicos de restauración de monumentos:



1. sondeo CPT a-f. estratos de suelo

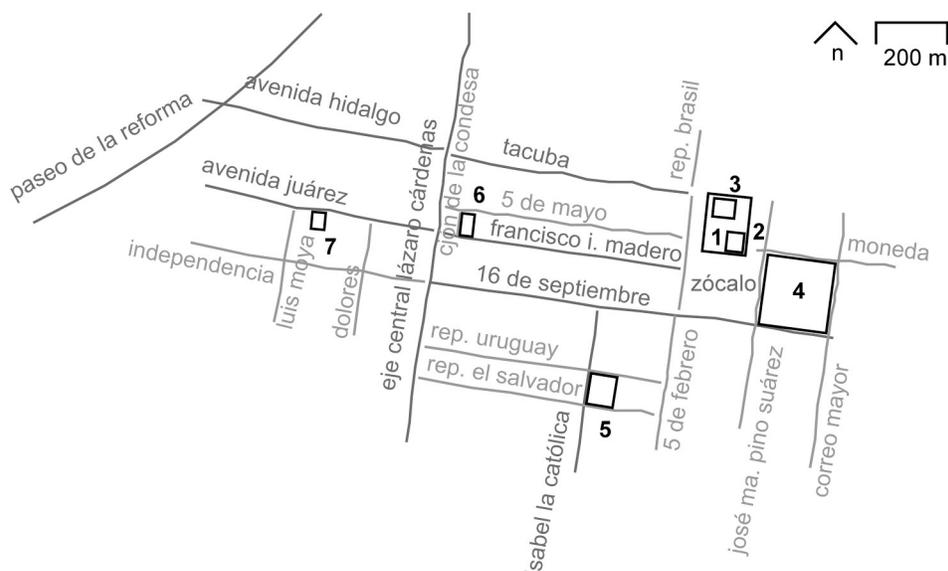
**Figura 4.2. Corte geotécnico típico del centro de la ciudad de México.**

estrato	profundidad	descripción
a	0.0 m – 12.9 m	relleno artificial constituido por material heterogéneo
b	12.9 m – 16.0 m	costra natural formada principalmente por limo arcilloso
c	16.0 m – 37.7 m	serie arcillosa superior
d	37.7 m – 41.6 m	capa dura, compuesta por una secuencia de arenas finas limosas y limos arcillosos
e	41.6 m – 51.6 m	serie arcillosa inferior
f	51.6 m en adelante	depósitos aluviales inferiores, integrados por arenas finas limosas y gravas pumíticas

**Tabla 4.1. Secuencia geotécnica en el centro histórico de la ciudad de México.**

El nivel freático en la zona descrita varía de acuerdo con la época del año desde 7.5 m a 9.0 m de profundidad, medidos respecto al nivel de la banqueta.

Los ejemplos de la ciudad de México que se mencionan se ubican en su centro histórico, como se puede observar en el esquema a continuación.



1. Catedral Metropolitana 2. El Sagrario 3. Capilla de las Ánimas  
 4. Palacio Nacional 5. Antiguo Templo de San Agustín  
 6. Casa de los Azulejos 7. Antiguo Templo de Corpus Christi

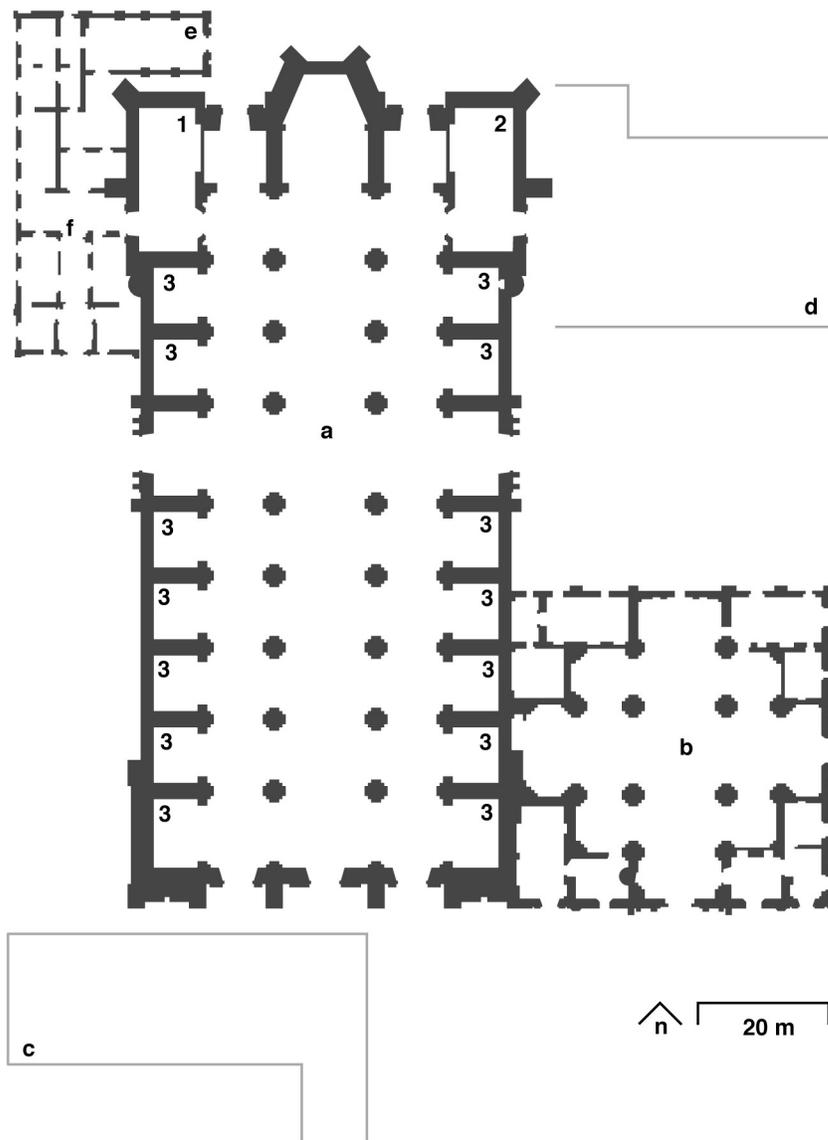
**Figura 4.3. Ubicación de los monumentos en el centro histórico de la ciudad de México.**

#### 4.2.1. catedral metropolitana y el sagrario

Entre 1524 y 1528 el conquistador español Hernando Cortés ordenó la construcción de una iglesia parroquial en el actual zócalo de la ciudad de México. Sin embargo, dado que aquella era pequeña y no digna para la colonia, pocas decenas de años después, las autoridades deciden construir una magna Catedral. La preparación del suelo, cimentaciones y otros trabajos preliminares empezaron en 1560; trece años después principió la construcción de la superestructura. En 1672 se terminan las bóvedas, las torres en 1792 y el templo se completó solamente en 1813.

La Catedral Metropolitana tiene cinco naves (Fig. 4.4): la central es cercada por 16 columnas y dividida por el coro; dos pasillos procesionales corren a lo largo de la longitud de la iglesia; las naves laterales restantes contienen capillas, a su vez cercadas por muros perimetrales y perpendiculares. El templo mide 60.40 m de ancho y 126.67 m de largo con un peso total de 12,700 kN y transmite una presión promedio al subsuelo de aproximadamente 166 kPa. El Sagrario tiene planta en cruz Griega (Fig. 4.4), con muros en las cuatro esquinas, los cuales constituyen la parte resistente de la estructura; su domo descansa en cuatro columnas centrales. Cubre un área cuadrada de 47.7 m de lado, peso aproximado de 3,000 kN y la presión media transmitida al suelo es de aproximadamente 132 kPa (Cortés Rocha et al, 2006; Ovando-Shelley et al, 2008).

La Catedral Metropolitana fue construida dentro de una parte del terreno que ocupó el Centro Ceremonial Azteca. Bajo su cimentación quedaron restos de algunas de las estructuras de este importante sitio prehispánico.

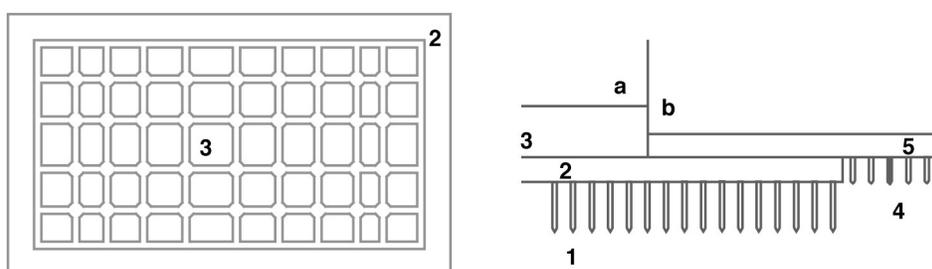


a. Catedral Metropolitana, construida entre 1573 y 1813 b. El Sagrario, construido entre 1749 y 1768 c. Catedral antigua, construida entre 1524 y 1528, demolido en 1625 d. Seminario, construido entre 1795 y 1800, demolido en 1938 e. Capilla de las Ánimas, construida en 1725 f. actual Museo, construido en 1725  
1. sala capítular 2. sacristía 3. capillas laterales

**Figura 4.4. Planta esquemática del complejo religioso con etapas de construcción y demolición de todas las dependencias.**

El terreno de cimentación del complejo religioso fue, en una primera etapa, reforzado mediante la hincada de aproximadamente 22,500 estacaones de madera, que funcionan como inclusiones rígidas. Encima de estos se colocó una plataforma de mampostería (Fig. 4.5), que ocupa una

superficie de 140 m de largo por 70 m de ancho. El espesor de este pedraplén, que en promedio es de unos 90 cm, aumenta hacia el sur lo cual evidencia que los primeros constructores debieron engrosarlo en esa zona para compensar los hundimientos diferenciales que comenzaron a manifestarse desde las primeras etapas de su construcción. Sobre la plataforma se construyó una retícula de contratrabes, también de mampostería, de 3.5 m de alto, 2.5 m de ancho y hasta 125 m de largo, que recibe a los muros, pilastras y columnas. El plano superior del pedraplén coincidía con el nivel de la Plaza Mayor y por encima de éste se elevaba 3.5 m la retícula de contratrabes. La Catedral se sobreelevó, seguramente porque el alarife Arciniega ya esperaba que se presentaran hundimientos de gran magnitud (Cortés Rocha et al, 2006; Ovando-Shelley et al, 2008).



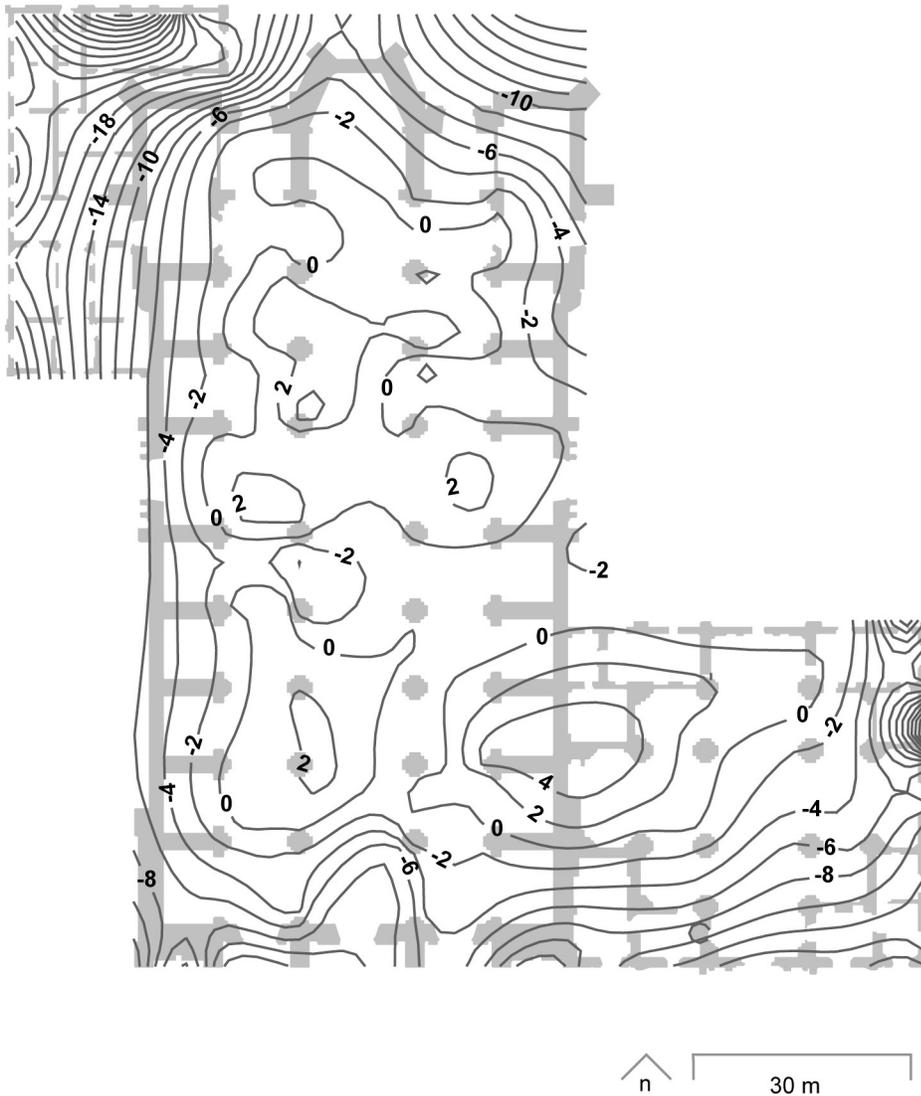
1. estacones de la Catedral
2. pedraplén de la Catedral
3. contratrabes de mampostería de la Catedral
4. estacones de El Sagrario
5. pedraplén de El sagrario

**Figura 4.5. Planta y corte esquemáticos de las cimentaciones de la Catedral Metropolitana y de El Sagrario.**

## Problemas

Por más de cuatro siglos la Catedral ha acumulado grandes asentamientos que produjeron distorsiones y grietas en las bóvedas, el domo, arcos y muros. Además, los sismos que suelen azotar a la ciudad provocan daños e incrementan la vulnerabilidad sísmica de la construcción. La figura 4.6 muestra los hundimientos que sufrían la Catedral Metropolitana y El Sagrario antes de la última intervención de salvaguarda.

Para contribuir a los asentamientos diferenciales del complejo, su peso propio induce la consolidación del subsuelo, que es no uniforme debido a que las propiedades del terreno de cimentación son bastante erráticas. También, el bombeo excesivo de agua desde los acuíferos que subyacen las arcillas del valle de México conduce al abatimiento piezométrico en dichas arcillas por lo que se da el fenómeno de hundimiento regional y, los consecuentes asentamientos diferenciales. Este último efecto es el consecuente principal de los daños que ha sufrido la Catedral durante los últimos 100 años.



Mediciones realizadas por TGC para el período de enero a septiembre de 1991.

**Figura 4.6. Curvas de igual velocidad de asentamientos en mm/año.**

## Soluciones

Lo más probable es que las intervenciones realizadas en la Catedral hayan empezado desde el término de su construcción. En la década de 1920 se intentó sin buen éxito recimentar la iglesia de El Sagrario. En 1933 se demuele el seminario con el fin de aliviar las presiones aplicadas en el lado noroeste de la Catedral. A mediados del siglo XX se construye una losa de cimentación de concreto, de unos 50 cm de espesor, en todo el área ocupada por la Catedral; como complemento se colocaron vigas transversales y longitudinales en la nueva cimentación, pero

fueron abiertas en muchas zonas para crear acceso a las criptas, con consecuente disminución de la rigidez.

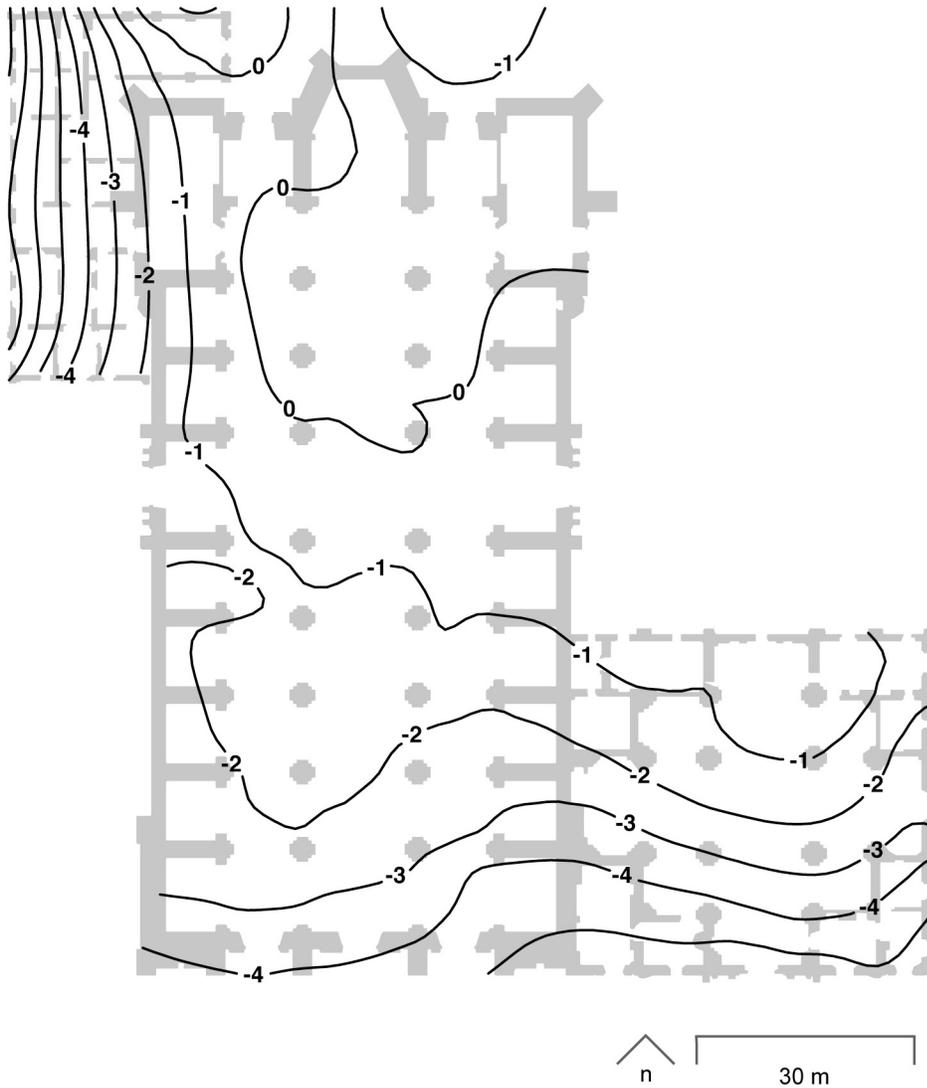
Entre 1973 y 1976 se procede a recimentar el complejo religioso, por lo que se instalaron 387 pilotes de control, con diámetros entre 40 y 45 cm y capacidad última entre 720 y 900 kN. Estos fueron hincados en segmentos de 90 cm y sus puntas se llevaron hasta la profundidad de la capa dura (estrato *d*, de la figura 4.2) en la base de la primera formación arcillosa. La distribución de pilotes que se adoptó, obedeció a la idea simplista de que la estructura se hundía hacia el sur; nunca se realizaron mediciones para interpretar el complejo patrón de hundimientos. Por otra parte, en cuanto a su profundidad, sólo el 27% de dichos pilotes están debidamente apoyados en la capa dura.



1. lunbrera de acceso a la los suelos blandos 2. tubos sub-excavadores hincados a presión con cilindro hidráulico 3. detalle de las ventanas por las que penetran los tubos

**Figura 4.7. Imágenes de la subexcavación de la Catedral Metropolitana y de El Sagrario.**

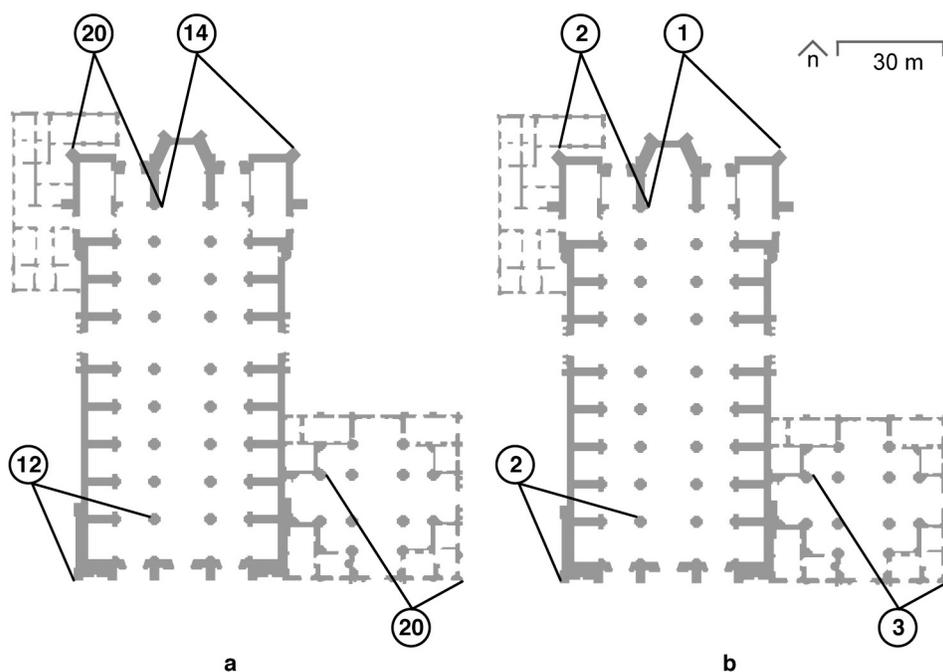
Finalmente, se decide subexcavar ambos monumentos (Fig. 4.7). La técnica se aplicó en la parte inferior de lunbreras de concreto, con diámetro no mayor que 3 m, distribuidos a lo largo del área de construcción de la Catedral y de El Sagrario, en intervalos de aproximadamente 1 m y con una longitud total de 6 a 22 m. La profundidad de dichos ejes alcanza la primera formación arcillosa, variando entre 17 y 22 m, dependiendo del espesor de los rellenos superficiales.



Mediciones realizadas por TGC para el período de diciembre de 2005 a diciembre de 2007.

**Figura 4.8. Mediciones recientes de las curvas de igual velocidad de asentamientos en mm/año.**

Como apoyo a la subexcavación se realizó el bombeo de agua desde el fondo de las lumbreras, con el fin de operar en condiciones secas. Dado que el bombeo produce asentamientos adicionales, la secuencia de operación fue diseñada para producir deformaciones correctivas. La caída de presión de poro promedio al nivel del pozo se estimó en 12 kPa, lo que indujo asentamientos a largo plazo del orden de 12 cm en la parte norte de la Catedral, de aproximadamente 9 cm cerca del transepto y 5 cm cerca del atrio sur. Los efectos del bombeo alcanzaron algunos 38 m de profundidad, inferidos de la evolución de la presión de poro medida con piezómetros de cabeza abierta instalados en el atrio sur (Santoyo et al, 2005).



a. comportamiento inicial (mediciones de enero a septiembre de 1991)  
 b. comportamiento actual (mediciones de diciembre de 2005 a diciembre de 2007)

**Figura 4.9. Comparación de velocidades de hundimiento anual en mm.**

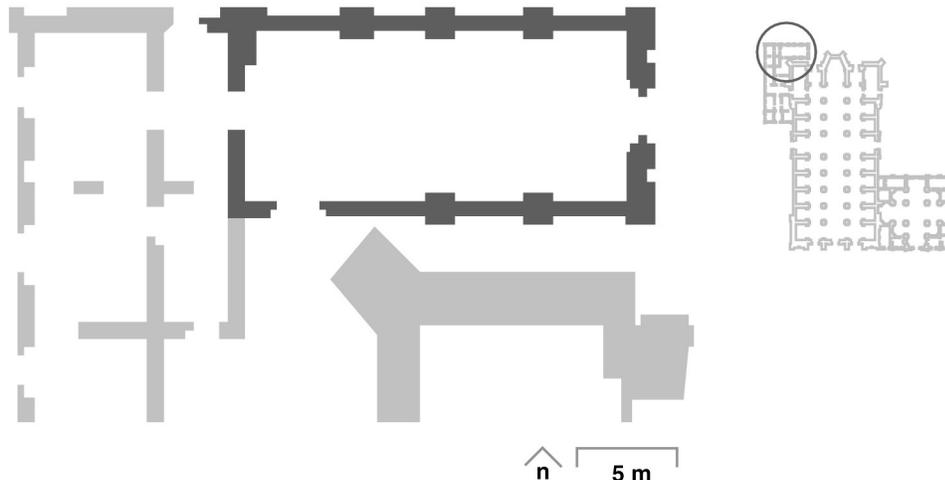
Con base en mediciones recientes (Fig. 4.8), se concluye que la subexcavación de la Catedral Metropolitana y de El Sagrario, no solo corrigió los errores cometidos en el pasado, sino también fue capaz de combatir al inevitable hundimiento regional de la ciudad de México (Fig. 4.9). En zonas sujetas a este destructor fenómeno, principalmente en concomitancia con distribuciones complejas de compresibilidades del subsuelo, la subexcavación tiene que ser vista como una medida temporal; asimismo, lo más probable es que el complejo religioso icono de México tendrá que ser sometido a una nueva etapa de subexcavación, o en su ausencia a otra medida quizás más efectiva o más drástica.

#### 4.2.2. capilla de las ánimas

La Capilla de las Ánimas, construida en 1725 (después de la Catedral y antes de El Sagrario), se sitúa en la esquina noroeste de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México, sobre el lugar en donde alguna vez estuvo el mayor juego de pelota de Tenochtitlán. Es un monumento simple pero encantador, estucado con un rojo vivo muy al estilo mexicano; no obstante, actualmente se encuentra muchas veces cerrado al público debido a todo lo que ha sufrido con las estructuras vecinas, superficiales y enterradas. Los estigmas del monumento son literalmente visibles (Fig. 4.11).

Su estructura es de mampostería, con una única nave abovedada; el monumento tiene 19.54 m de longitud, 9.31 m de ancho y 9.25 m de altura (Fig. 4.10).

La cimentación original era de zapatas corridas de mampostería; en la parte sur se desplantaban sobre el pedraplén de la cimentación de la Catedral y sobre otros elementos de esa época.



En la zona noroeste de la Catedral Metropolitana se ubica la Capilla de las Ánimas.

**Figura 4.10. Ubicación y planta de la Capilla de las Ánimas.**

## Problemas

Las sobrecargas impuestas al subsuelo por la capilla, durante su construcción y en los años subsecuentes, le indujeron asentamientos diferenciales. Más tarde, desde la segunda mitad del siglo XIX, el hundimiento regional acentuó estos diferenciales de asentamientos. Por la cercanía entre la Capilla de las Ánimas y la Catedral Metropolitana, y debido a que la primera está en parte desplantada sobre el antiguo pedraplén de cimentación de la segunda, la Capilla ha sufrido bastante con las interacciones de la estructura vecina.

En 1993 empezaron los trabajos de subexcavación de la Catedral Metropolitana por lo que, la capilla fue recimentada provisoriamente. A pesar de esto, durante los cinco años de duró dicha subexcavación los efectos de los asentamientos diferenciales aumentaron, ya que fue precisamente en la zona norte de la Catedral que se realizaron las correcciones de mayor magnitud.

Por lo demás, de acuerdo con los resultados de la campaña de exploración geotécnica, se comprobó que el muro norte de la capilla se ubica a 30 cm del muro Milán de la Línea 2 del Metro, que corre por la calle de Guatemala. Los abultamientos de dicho muro penetraban por debajo de la pequeña iglesia transformándose en un apoyo indeseable.



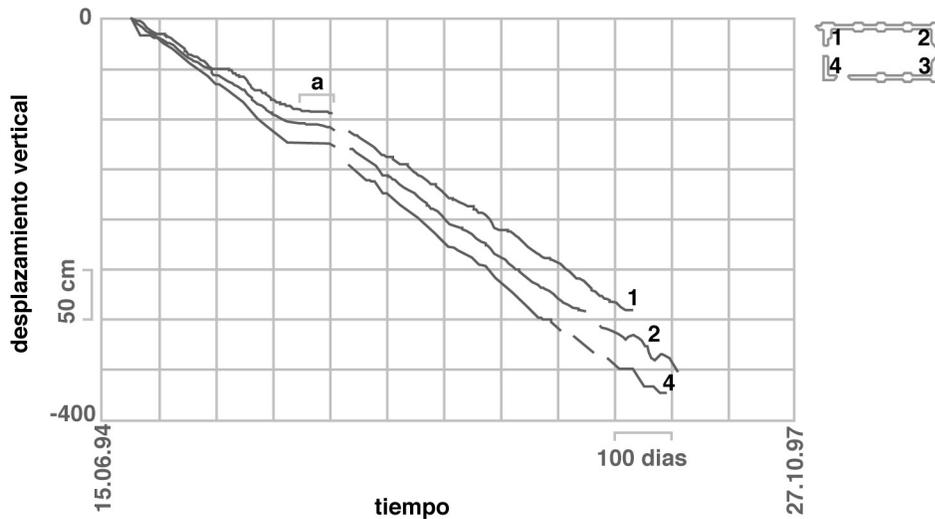
Junto a los santos, se observan los tensores que van soportando los muros de la Capilla de las Ánimas, estigmas visibles a todo transeúnte. La edad y entorno del monumento no perdonan, por ello se sostiene ya con algunas muletillas.

**Figura 4.11. Vista del muro norte de la Capilla de las Ánimas.**

Concomitantemente, en las zapatas norte y sur de la Capilla de las Ánimas, se encontró que algunas puntas de las contratrabes transversales no alcanzaron su longitud de proyecto, a causa de la interferencia con los brocales del muro Milán del Metro y con la cimentación de la Catedral, respectivamente. Finalmente se observó que las plantillas de concreto que reciben a las contratrabes de recimentación transversales estaban unidas a la cimentación colonial de la Catedral.

En la gráfica que sigue (Fig. 4.12) se puede observar el desplazamiento de algunos puntos de control de las contratrabes. En ella se aprecia que se hundían algunos 50 cm cada 150 días, es decir 10 cm al mes aproximadamente, hasta que durante el paro de la subexcavación

prácticamente se estabilizan. Cuando esos trabajos reempiezan, la velocidad de hundimiento continua aproximadamente igual a la anterior.



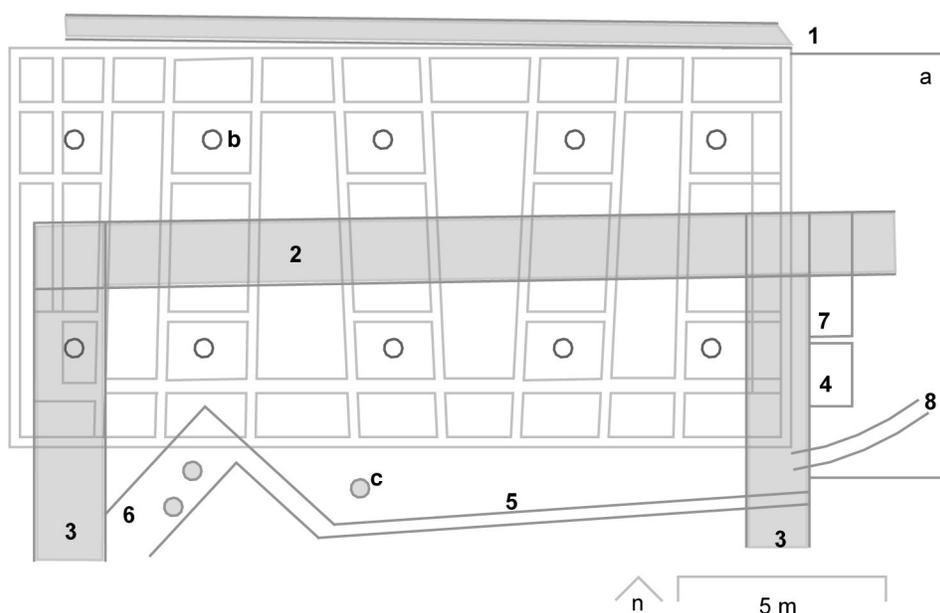
- 1, 2, 4. puntos de control de las contratraves de la Capilla de las Ánimas
- 3. punto sin mediciones 150 días después del inicio de las mediciones
- a. paro temporal de la subexcavación

**Figura 4.12. Hundimientos de algunos puntos de control en las contratraves de cimentación de la Capilla de las Ánimas.**

## Soluciones

En la recimentación transitoria como previsión contra los efectos de la subexcavación en la Catedral, realizada en 1991, se colocaron 10 pilotes de punta con control mecánico y funda para eliminar la fricción negativa; se apoyaron en la primera capa dura (estrato *d* de la Fig. 4.2) a una profundidad de 38.5 m, con longitud efectiva de 36.5 m. También se construyeron vigas de concreto reforzado adosadas a los cimientos de mampostería para el apoyo de aquellos pilotes.

Como ya se ha mencionado, la compleja interacción entre la cimentación de la Catedral, la de la Capilla y el muro del Metro evitó que la recimentación parcial de 1991 funcionara adecuadamente (Fig. 4.13). La recimentación definitiva se diseñó para lograr que la Capilla funcionara como un elemento aislado e independiente de las estructuras que la rodean (la cimentación de la Catedral en sus lados sur y oriente, el muro Milán del Metro en su lado norte y la cimentación del Museo a lo largo de su muro poniente). Esta intervención consistió básicamente en el refuerzo de los pilotes de punta ya instalados y en el refuerzo de las contratraves de la recimentación provisoria.



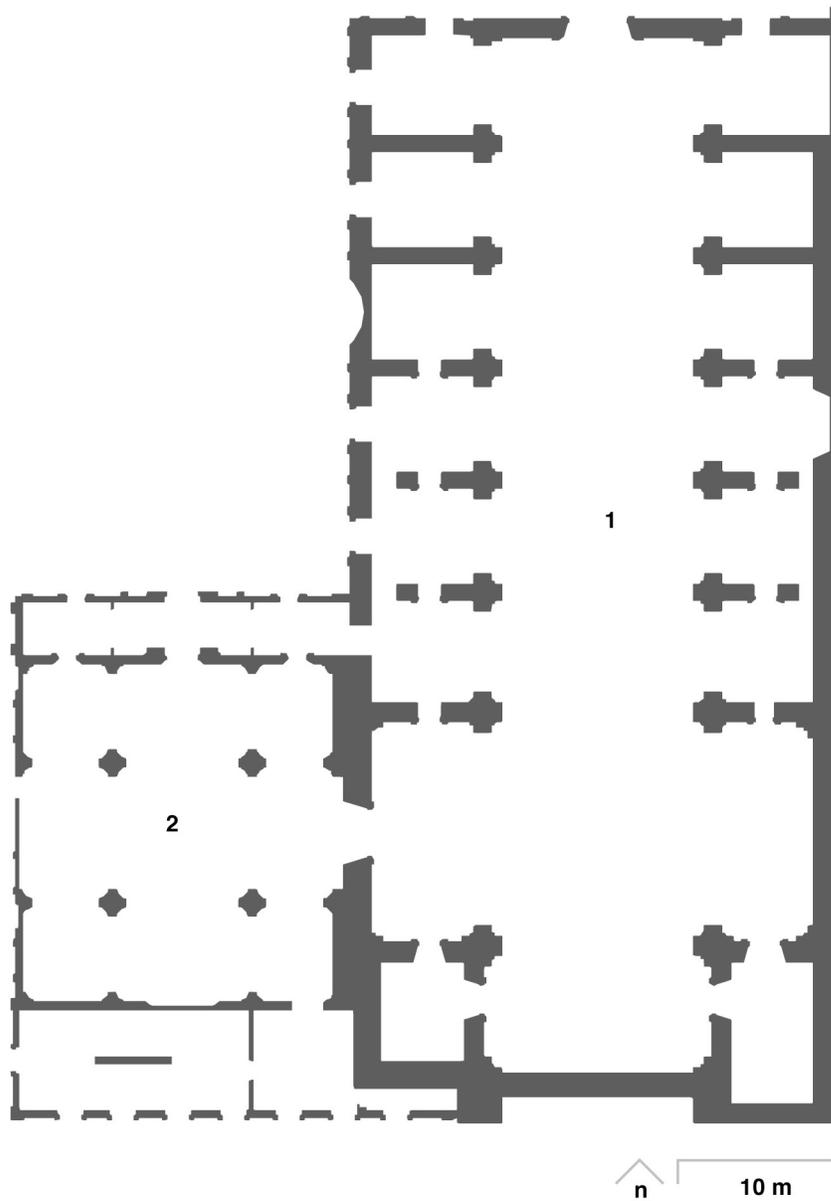
1. muro Milán del Metro 2. contratrabe E-W de la cimentación de la Catedral  
 3. contratrabe N-S de la cimentación de la Catedral  
 4. contrafuerte de la cimentación de la Catedral 5. cimentación del muro norte de la sala capítular 6. cimentación del contrafuerte de la sala capítular 7. relleno con conductos de teléfono 8. conducto eléctrico  
 a. Catedral Metropolitana b. pilote de punta con funda c. pilote de fricción negativa

**Figura 4.13. Planta de la cimentación de la Capilla de las Ánimas, con las interferencias e intervenciones realizadas.**

Si se tiene en cuenta que la dimensión del monumento es ínfima comparada con la Catedral Metropolitana, que los muros de sostenimiento del Metro de la ciudad de México son un apoyo altamente indeseable, y que la heterogeneidad de los vestigios arqueológicos enterrados conllevan a propiedades del subsuelo distintas bajo la Capilla, las numerosas y obstructoras intervenciones fueron imprescindibles para la preservación de tan pintoresco monumento. Hoy la Capilla de las Ánimas se encuentra finalmente “segura”, hasta que otro problema aparezca para volver a colocarla en riesgo.

#### 4.2.3. antiguo templo de san agustín

El antiguo templo de San Agustín se localiza en el extremo poniente de la manzana que forman las calles de Isabel La Católica, 5 de Febrero, Republica de El Salvador y República de Uruguay (Fig. 4.3). El conjunto arquitectónico está constituido por dos cuerpos: el templo propiamente dicho y la Capilla de la Tercera Orden (Fig. 4.14). La nave del templo se encuentra cubierta por una bóveda de cañón corrido, y el crucero lo cierra una cúpula semiesférica.



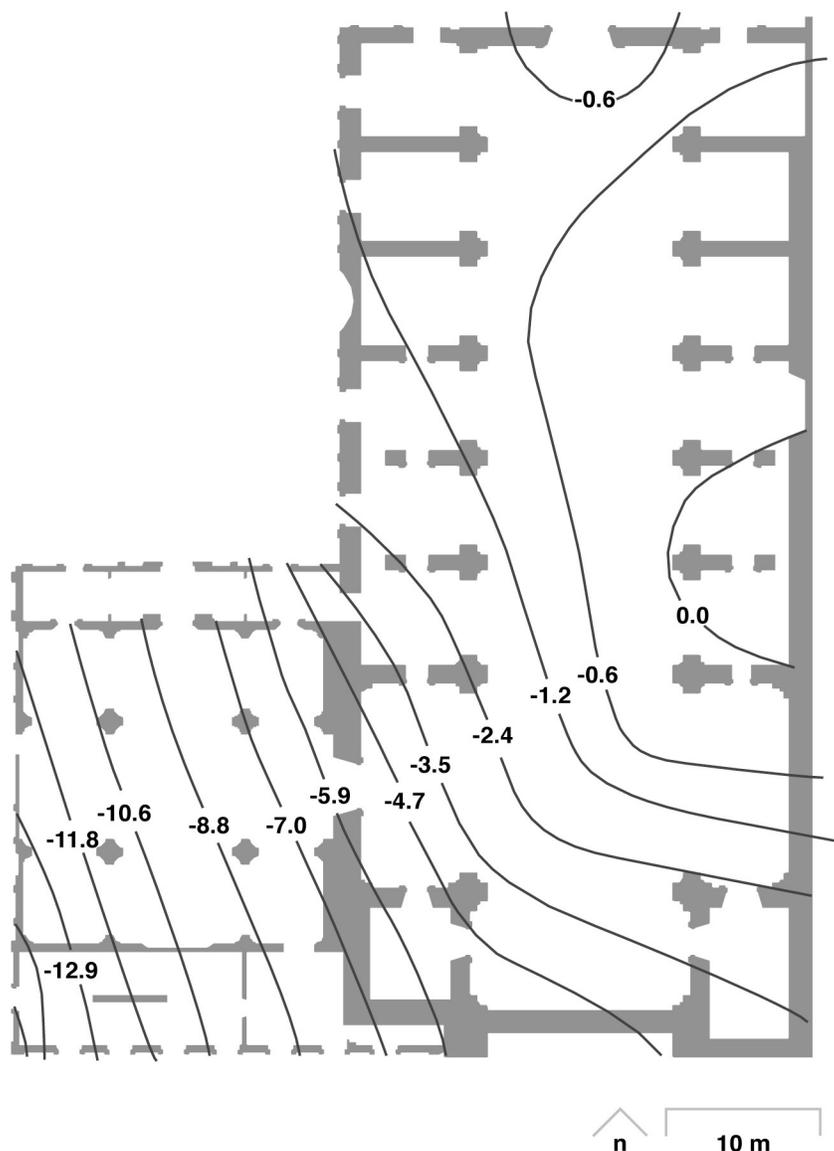
1. Templo de San Agustín 2. Capilla de la Tercera Orden

**Figura 4.14. Planta esquemática del Antiguo Templo de San Agustín.**

Con base en los estudios realizados, se determinó que la cimentación está constituida por una retícula de arcos de mampostería que descansan sobre estacones. Los de menor dimensión se ubican longitudinalmente, bajo los arcos de acceso a las capillas laterales. En la nave central la cimentación se compone de arcos invertidos que unen transversalmente a las pilastras; esta solución favorece la concentración de cargas, en cada una de dichas pilastras. Los muros que cierran a las capillas laterales funcionan como contrafuertes y están apoyados sobre zapatas de mampostería, tal como los muros perimetrales.

## Problemas

El antiguo templo de San Agustín estuvo sometido a una complicada historia de cargas desde el inicio de la construcción del primer templo, en 1553, hasta que se terminaron las adaptaciones para convertir a la antigua iglesia del siglo XVII en biblioteca, en 1882.



Mediciones realizadas por UNAM para el período de septiembre de 1978 a  
septiembre de 1995.

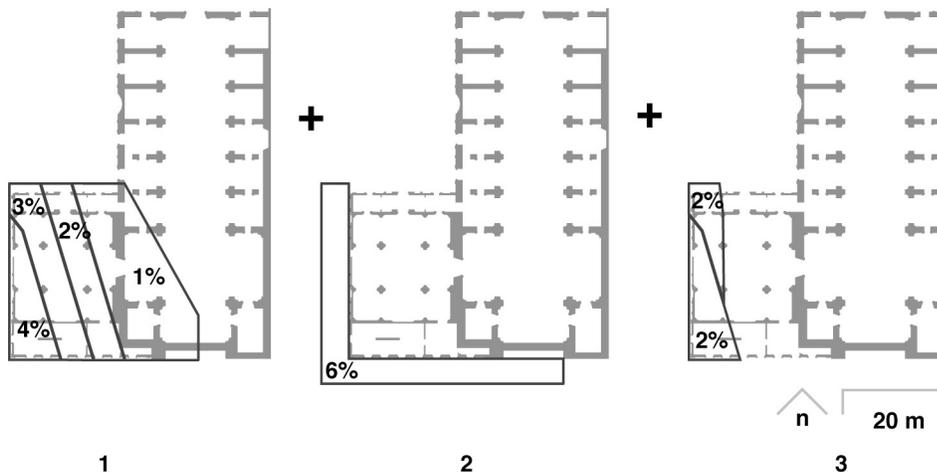
**Figura 4.15. Curvas de igual velocidad de hundimiento diferencial, en mm/año, antes de las intervenciones.**

Las condiciones naturales del lugar así como las cargas aplicadas posteriormente contribuyeron a la heterogeneidad de las propiedades mecánicas del subsuelo, principalmente a la compresibilidad.

Los hundimientos que sufrieron las primeras dos iglesias condujeron a su demolición. La última iglesia siguió acumulando deformaciones, situación que se mantuvo cuando fue convertida en biblioteca. Finalmente, los abatimientos piezométricos inducidos por el bombeo de agua fueron los que exacerbaban la aparición de diferenciales de hundimiento, hecho que sostuvo hasta hace muy poco (Fig. 4.15).

## Soluciones

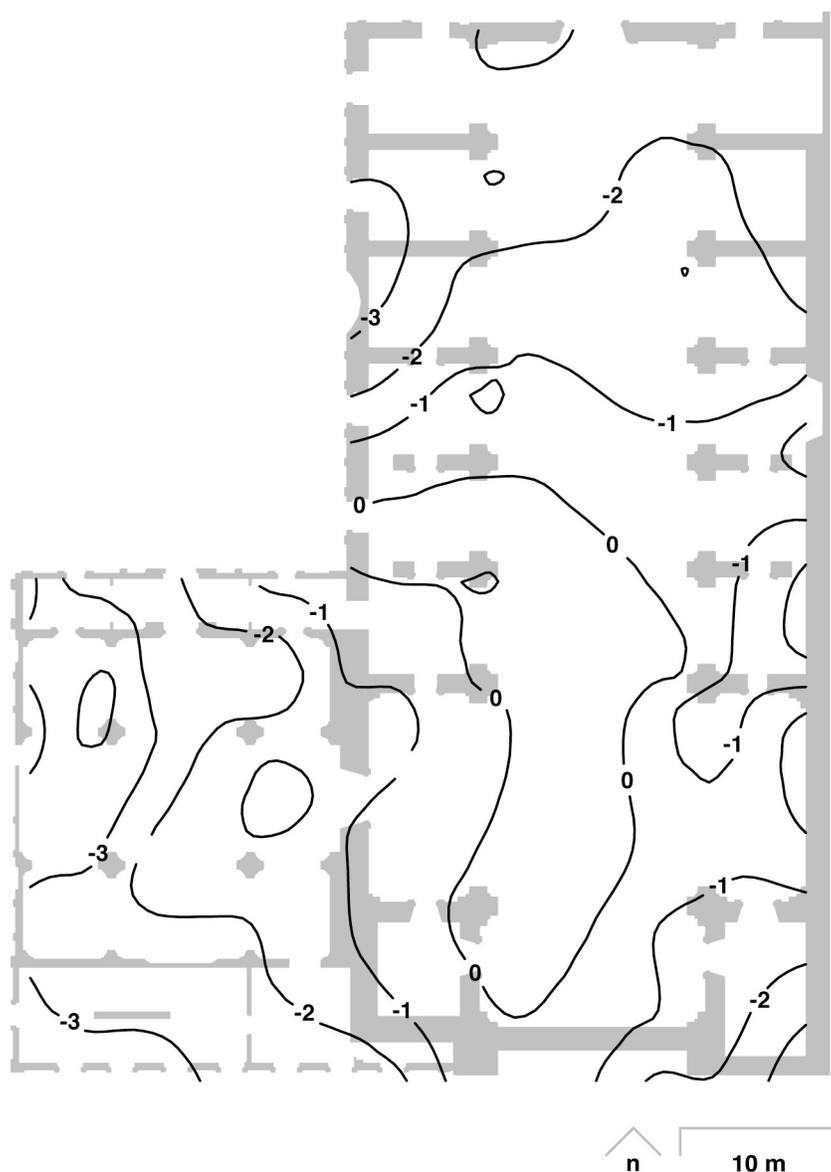
La técnica de salvaguarda adoptada fue el endurecimiento selectivo del subsuelo, que comenzó en febrero de 1999 y terminó en marzo de 2002 (Fig. 4.16). Este procedimiento consistió en la formación de núcleos de mortero de 25 cm de diámetro y longitud variable de 32 a 35 m; las inyecciones laterales en los tubos de manguitos indujeron fracturamiento hidráulico en el suelo para formar láminas de refuerzo verticales de aproximadamente 7.5 cm de espesor en la cercanía del núcleo de mortero.



1. periodo de 8 de febrero a 30 de abril de 1999 (área inyección igual a 1,816 m<sup>2</sup>) 2. periodo de 22 de octubre de 2001 a 8 de febrero de 2002 (área inyección igual a 330 m<sup>2</sup>) 3. periodo de 11 de febrero a 4 de marzo de 2002 (área inyección igual a 302 m<sup>2</sup>)

**Figura 4.16. Etapas de inyección en el antiguo templo de San Agustín.**

Al finalizar la tercera y última etapa de inyecciones la cantidad de mortero inyectado en la esquina suroeste alcanzó 6% con respecto al volumen total de la masa de suelo sometida al tratamiento.



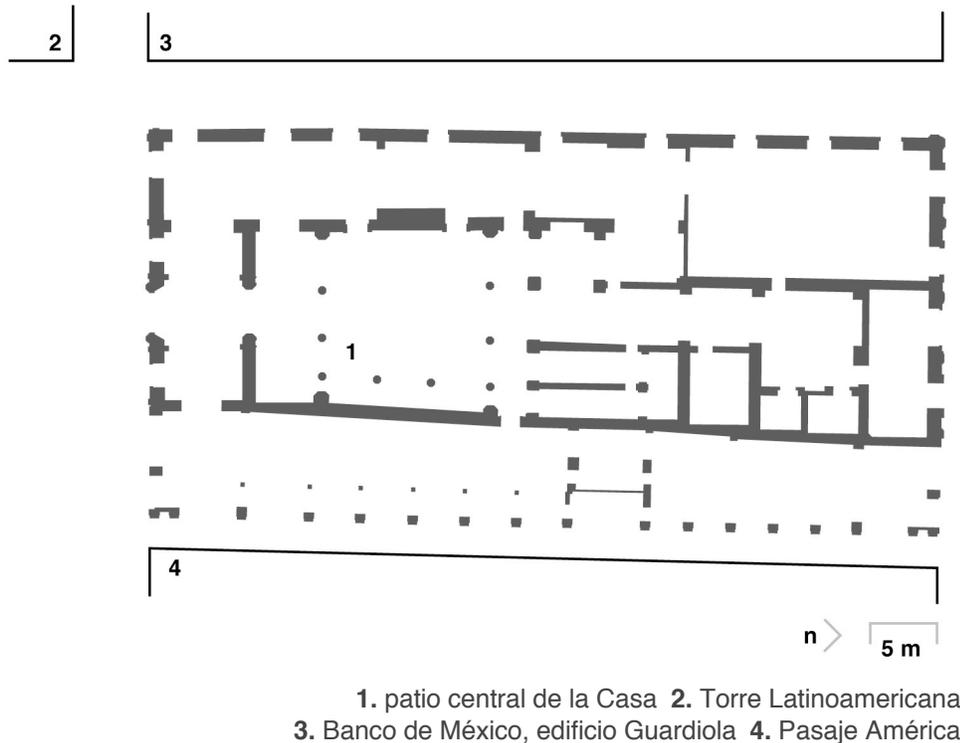
Mediciones realizadas por TGC para el período de octubre de 2006 a octubre de 2007.

**Figura 4.17. Curvas de igual velocidad de hundimiento diferencial, en mm/año, después de las intervenciones.**

Finalmente el monumento ha sido protegido del hundimiento regional. La inyección de morteros es una medida que afecta directamente al subsuelo de apoyo y no al monumento sostenido, y por tanto lo respeta sobremanera. Hasta la fecha, y de acuerdo con mediciones recientes (Fig. 4.17), la medida ha reducido sustancialmente los diferenciales de hundimiento que estaban destruyendo la superestructura y conduciendo el edificio a la ruina.

#### 4.2.4. casa de los azulejos

La Casa de los Azulejos se encuentra en el extremo poniente de la manzana delimitada por las calles de Madero, 5 de Mayo, Condesa y Gante (Fig. 4.3); su colindancia oriente está ocupada por el Pasaje América, parte de un edificio que consta de un cuerpo de cuatro niveles y otro de seis. Al poniente de la calle de la Condesa se encuentra una construcción del Banco de México, el edificio Guardiola, que se construyó en la década de los años treinta. Al suroeste de la Casa de los Azulejos, en la acera opuesta, se encuentra la Torre Latinoamericana (Fig. 4.18).



**Figura 4.18. Planta de la Casa de los Azulejos y edificios colindantes.**

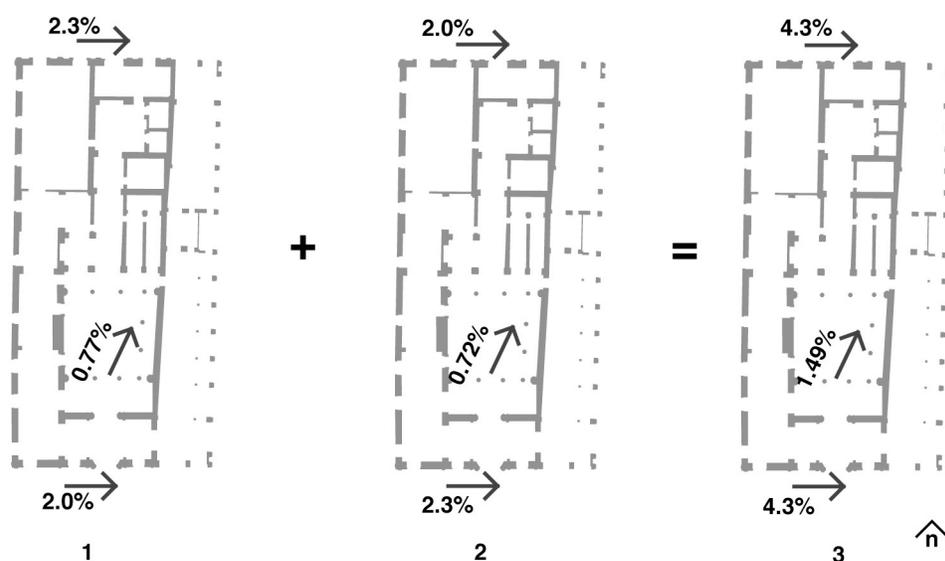
La casa actual tiene planta baja con dos niveles y es el resultado de la unión, en 1604, de dos viviendas que se construyeron por el año de 1524. Se sabe que en 1659 el edificio se encontraba en muy mal estado, por lo que se remodeló y modificó prácticamente desde su cimentación.

En el año de 1900 se demuele el Teatro Nacional y al prolongar la calle 5 de Mayo hasta San Juan de Letrán (hoy Eje Central), fue demolida la parte trasera de la casa, que años más tarde fue reedificada, incluyendo la fachada. Treinta años después se construye el edificio Guardiola del Banco de México, al poniente de la calle de la Condesa, para lo cual se hincaron pilotes de concreto (los primeros en la ciudad de México) muy probablemente hasta la primera capa dura (estrato *d* de la Fig. 4.2). En 1956 se termina la Torre Latinoamericana, que se ubica en la esquina suroeste de la Casa de los Azulejos. Finalmente, en 1967 se lleva a cabo la construcción

del colector semi-profundo de 3.0 m de diámetro a 15.0 m de profundidad bajo la superficie de la calle 5 de Mayo.

## Problemas

Las deformaciones que afectan a la Casa de los Azulejos se deben principalmente al hundimiento regional. Por un lado, la cimentación piloteada del edificio Guardiola provoca que el subsuelo limítrofe se “cuelgue” desde su periferia y ha impedido que el costado poniente de la casa siga al hundimiento regional, lo cual ha ocasionado que la estructura gire en la dirección contraria, es decir, hacia el oriente (Fig. 4.19). Por otro, la presencia del colector semi-profundo bajo la calle de 5 de Mayo ha incrementado los abatimientos piezométricos en el costado norte lo cual, a su vez, provocó que la construcción también girara hacia esa dirección.



1. distorsiones antes de la intervención 2. distorsiones futuras sin intervención 3. distorsiones futuras acumuladas

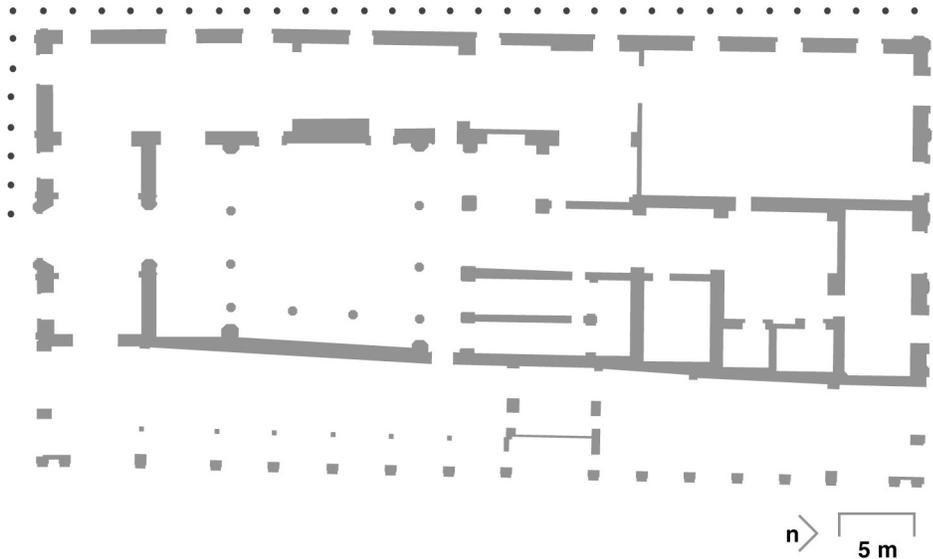
**Figura 4.19. Previsión de la distorsión angular en la estructura.**

## Soluciones

De acuerdo con la estimación de los asentamientos diferenciales futuros (Fig. 4.19), se planteó formar una superficie vertical de baja resistencia al esfuerzo cortante, entre la Casa de los Azulejos y el edificio Guardiola, hasta la primera capa dura, a 32 metros de profundidad (estrato *d* de la Fig. 4.2). Este plano permitirá que el costado poniente de la casa se hunda libremente, sin que sus desplazamientos estén restringidos por los pilotes del edificio Guardiola.

Para realizarlo se instalaron tubos de PVC, con perforaciones laterales a cada metro (con válvulas de manguito), en pozos a 28 m de profundidad separados entre sí a cada 2 m y se ubicaron principalmente sobre el callejón de la Condesa, a una distancia de la edificación

aproximadamente igual a 1 m (Fig. 4.20). El plano de baja resistencia al esfuerzo cortante se formó inyectando un gel polimérico a presión para formar un plano vertical paralelo a la fachada del callejón de la Condesa. Para mantenerlo es necesario que por lo menos cada tres meses se realice la inyección de agua en el callejón de la Condesa.



Puntos representantes de los pozos de inyección de agua ubicados en el costado oeste de la Casa de los Azulejos.

**Figura 4.20. Ubicación de los pozos de inyección de agua.**

Hasta el momento, y de acuerdo con observaciones locales, la medida ha sido eficiente. A pesar de que no existan mediciones recientes, todo indica que el comportamiento del edificio ha mejorado y que ya no corre riesgos de estabilidad. No obstante, y como ya se ha subrayado, es necesaria la inyección periódica de gel polimérico, medida preventiva que mantendrá al monumento protegido de los edificios colindantes.

#### 4.2.5. antiguo templo de corpus christi

En 1720 el duque de Arión coloca la primera piedra del convento, obra del arquitecto Pedro de Arrieta; treinta años después el monumento es reedificado a mando del fraile Juan de Dios Rivera. El edificio cae en las manos de José Ives Limantour, ministro de Porfirio Díaz, en 1867, que lo demuele para construir su residencia particular pero que decide mantener el templo.

El 26 de septiembre de 1945 se inician las gestiones para instalar ahí el Museo Nacional de Artes Populares del INBA. En 1958 el Dr. Alfonso Caso recibe la autorización del INAH para que se ocupe el edificio del Museo. Hoy da guarida al Fondo Antiguo del Archivo General de Notarías de la ciudad de México (Valdés Krieg, 2005).

## Problemas

El templo de Corpus Christi, y la ampliación del Arq. José Villagrán, presentan daños estructurales (Fig. 4.21) provocados por el hundimiento regional que le ha generado asentamientos diferenciales y que reducen su estabilidad estructural.



Aun después de las intervenciones, es visible la distorsión de la estructura, resultado de los asentamientos diferenciales.

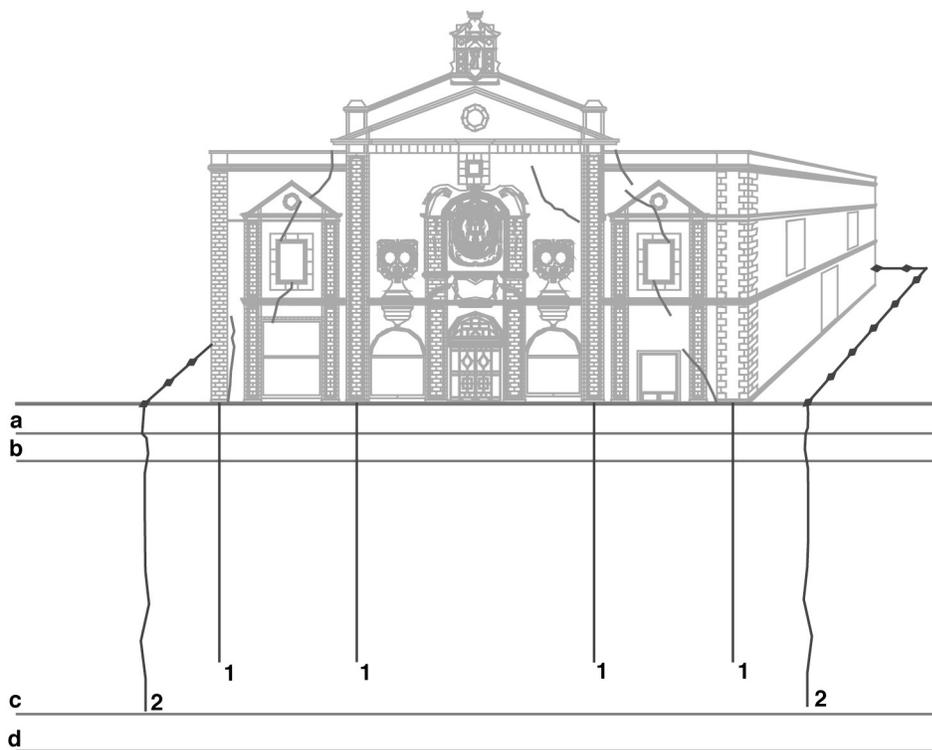
**Figura 4.21. Vista de parte de la fachada norte del monumento.**

El problema es similar al de la Casa de los Azulejos. La cimentación piloteada de los edificios que integraban el Conjunto Alameda impidió que el subsuelo colindante del Templo siguiera libremente al hundimiento regional, lo cual ocasionó que sus muros oriente y poniente se asentaran menos que la parte central del Templo, evidenciándose en la inclinación que presentaban las grietas de su fachada principal.

## Soluciones

Para mitigar los efectos del asentamiento diferencial que inducían las cimentaciones de los edificios vecinos al templo de Corpus Christi, se introdujo un plano vertical de baja resistencia al corte hasta 30 m de profundidad (Fig. 4.22), para lo cual se construyeron pozos de inyección de agua, separados 2.0 m entre sí.

La segunda acción que se llevó a cabo fue la instalación de 87 micropilotes (Fig. 4.22) como refuerzo de la cimentación del antiguo Templo de Corpus Christi, los cuales funcionan como reductores de deformabilidad. Su nivel de desplante está a 25.0 metros respecto al nivel de la banqueta (estrato *c* de la Fig. 4.2). Por el espesor de suelo deformable que tienen debajo de su punta no se espera un cambio brusco en el comportamiento del edificio sino solamente una reducción en su velocidad de hundimiento.



1. micropilote 2. fisura inducida  
a, b, c, d. estratos como descritos en la tabla 4.1

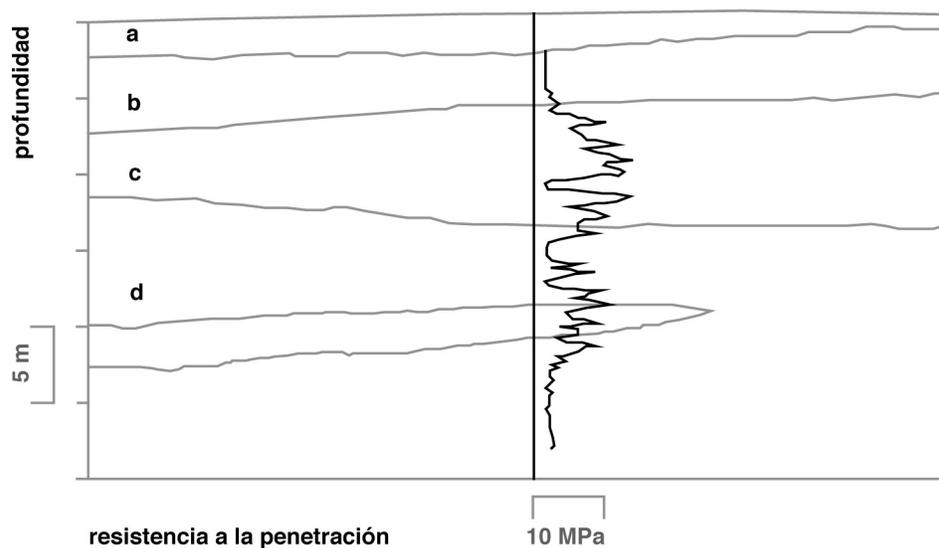
**Figura 4.22. Recimentación del antiguo Templo de Corpus Christi.**

Cualquier técnica de intervención con pilotes es bastante obstructora, sin embargo, la estabilidad del monumento, o de la superestructura, es más relevante. Por el contrario, el aislamiento de los edificios colindantes, por medio de un plano de baja resistencia al esfuerzo cortante, es bastante respetuoso de la construcción. A lo mejor, esta última medida sería suficiente para mantener al edificio, pero se decidió recimentar como prevención de eventuales problemas futuros. No existen

mediciones recientes del comportamiento del templo y, a pesar de lo que se observa en su fachada (Fig. 4.21), el monumento parece no correr riesgos mayores.

### 4.3. venecia, italia

Los suelos del lago de Venecia pertenecen al Cuaternario (Gottardi y Tonni, 2005); el perfil estratigráfico típico se describe en la tabla 4.2 y se puede observar en la figura 4.23.



a-d. estratos de suelo

Figura 4.23. Perfil de suelo con base en los resultados de sondeos y pruebas de piezocono.

estrato	profundidad	descripción
a	0.0 m – 3.0 m	relleno más o menos reciente, con 1 a 4 m de espesor
b	3.0 m – 7.0 m	arcilla limosa gris oscura, desde muy blanda a blanda, con material orgánico, normalmente consolidada
c	7.0 m – 14.0 m	estratos firmes a rígidos de arcilla, o de arena arcillosa ( <i>caranto</i> )
d	14.0 m en adelante	camadas de arcilla, o limo arcilloso, de consistencia media, que alternan con camadas de limo arenoso y arena fina

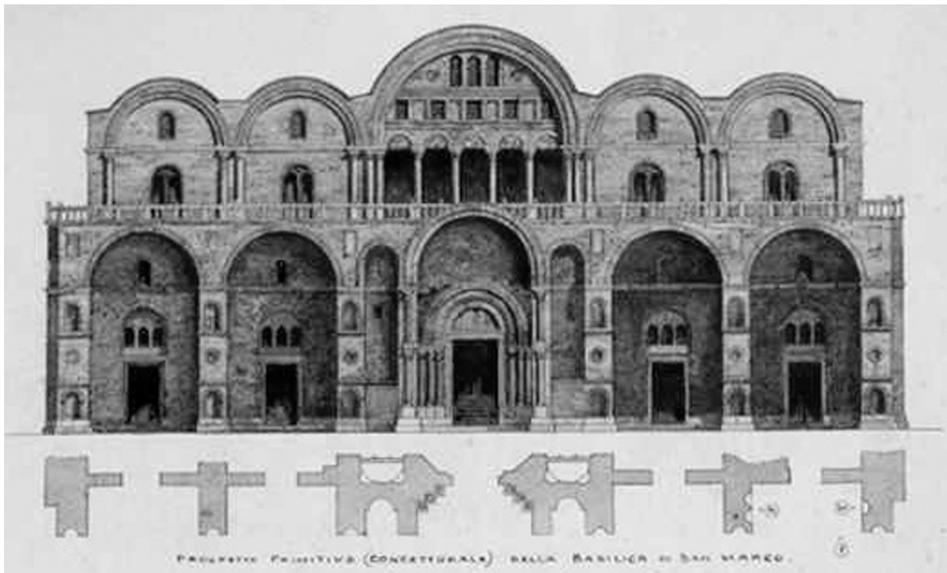
Tabla 4.2. Secuencia geotécnica del suelo de Venecia.

#### 4.3.1. basílica de san marcos

La erección de la Basílica de San Marcos empieza en 1063 y la edificación se consagra en 1094. Para ello, se demolió parcialmente la vieja iglesia que existía en el lugar, aprovechando

únicamente su cimentación, complementada con algunos muros de mampostería nuevos para el ábside y la nave. Estructuralmente se mejoró el monumento con una cripta y cinco grandiosos domos de ladrillo (Fig. 4.25), en sustitución del techo primogénito de madera (Fig. 4.24). Para soportar dichos domos y las bóvedas, se reforzaron los muros y las columnas, aunque se piensa que las cimentaciones no se tomaron en cuenta en dichos trabajos.

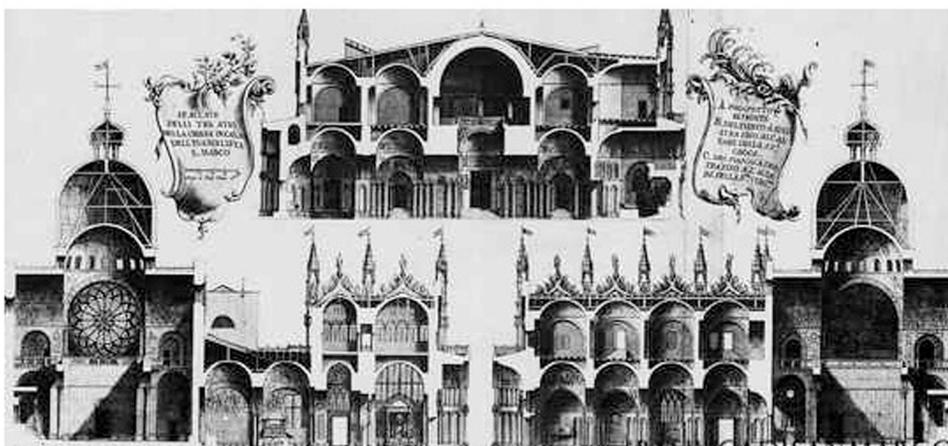
En los siglos XI y XII empieza la decoración bizantina con oro; el atrio se construye probablemente al final del siglo XII; en el inicio del siglo XIII se cubren los domos de mampostería con unos más grandiosos soportados por estructuras de madera, y se decora la fachada al estilo gótico (Fig. 2.2). Parte del atrio del siglo XII se convierte en Baptisterio en el siglo XIV, época en la que se termina la Basílica. Sin embargo, la construcción de los edificios contiguos continuó; en el siglo XV empieza la construcción de la sacristía junto al ábside, y la ampliación del palacio de los Doges.



La Basílica original, bastante más humilde que la actual, poseía un techo de madera relativamente liviano.

**Figura 4.24. Proyecto original de la Basílica (dibujo de A. Pellanda).**

Al comenzar el siglo XVI los daños en las estructuras del complejo religioso eran profusos, especialmente en los domos y bóvedas. De esta forma, en 1529, el arquitecto Sansovino se encarga de la reparación de dichos daños, para lo que introdujo tensores (probablemente de hierro) en las estructuras de mampostería y construyó dos contrafuertes en el lado izquierdo del ábside (Gajo, Soranzo y Vitaliani, 1996).



La actual Basílica, después de muchas mejoras, es bastante más imponente y digna de la república, pero también mucho más pesada.

**Figura 4.25. Sección actual del atrio occidental e interior de la iglesia.**

Después de la caída de la República Veneciana, al final del siglo XVIII, el gobierno austriaco cobra conciencia de la necesidad de preservar la Basílica. En ese entonces, Fantinelli se hace cargo del proyecto de los trabajos de restauración para la eficiencia estática de la estructura, así como de la inyección de muchos pilares que sostenían el domo principal (Gajo, Soranzo y Vitaliani, 1996).

### Problemas

Como se deduce de los antecedentes del monumento, la distribución de cargas en la Basílica de San Marcos fue significativamente alterada por los trabajos de restauración y la construcción de los edificios adyacentes. Los expertos mencionan que, los problemas principales de la Basílica están relacionados con la caída del cemento de baja calidad en las estructuras de mampostería, y con las características del subsuelo.

Casi todas las cimentaciones de la Basílica actual formaban parte de la antigua iglesia, las cuales fueron inspeccionadas durante los trabajos de restauración. La principal tipología de cimentación es la constituida por pilotes de madera cortos, en malas condiciones de preservación (longitud entre 1 y 1.5 m), los cuales soportan una losa de madera (10 cm de espesor) y varias capas de grandes piedras (con espesor promedio de 2 m), todo apoyando a la estructura de mampostería.

### Soluciones

Todavía no se toman decisiones en relación a los trabajos geotécnicos en la Basílica de San Marcos, uno de los ejemplos más significativos de problemas de estabilidad estructural que

generalmente afectan a los edificios venecianos. La Basílica debe ser considerada como un edificio de baja resistencia y con capacidad diminuta en la prevención de los asentamientos diferenciales.

Dado que las técnicas de recimentación son altamente obstructoras, un ensanchamiento de la cimentación existente podría ser la solución, o en caso de que una intervención a nivel del subsuelo fuera posible, el mejoramiento de este con inclusiones rígidas, por ejemplo, también se aceptaría como una solución respetuosa del monumento. Como medida más drástica se podría recimentar toda la Basílica, lo que iría contra los principios de restauración.

### 4.3.2. campanario de san marcos

El Campanario de San Marcos, según algunos, ha existido por más de mil años, o según otros por solamente un siglo. Su construcción es de 1514, pero la verdad es que la estructura que existe actualmente fue construida en 1912 como una réplica exacta de su precedente, la cual colapsó inesperadamente en la mañana de 14 de julio de 1902 (Fig. 4.26).



El Campanario quedó hecho polvo, como si en Venecia hubiera nevado en la mañana del 14 de julio de 1902.

**Figura 4.26. El colapso del Campanario.**

Los ojos de un arquitecto americano reportaron en el Times de Londres:

*“Los trabajadores habían estado apuntalando El Campanario, y descubrieron una gran grieta (...) Esta fisura había mostrado señales de que se estaba abriendo más, y ellos temían a los pequeños fragmentos que caían en la populosa Piazza (...)”*

*“(...) El ángel de oro de la torre estaba brillando a la distancia. De repente yo lo vi ahondarse lentamente hasta por debajo de una línea de tejados, y un polvo denso gris se levantó hacia las nubes (...) De aquel eje espléndido, todo lo que quedaba era un monte de polvo blanco, esparciéndose hacia los muros de San Marcos.”*

El nuevo Campanario fue bautizado el 25 de abril de 1912, exactamente mil años después de la fundación de la estructura original (Fig. 4.27).



Como si nada hubiera pasado, los venecianos vieron su Campanario erguirse en el aire “en donde estaba y como era”.

**Figura 4.27. La reconstrucción del Campanario.**

## Problemas

No obstante la reconstrucción total del monumento, la cimentación original estaba en buenas condiciones. Asimismo, en los trabajos de reconstrucción del campanario se contempló el alargamiento de la cimentación existente con la finalidad de reducir la presión transmitida al suelo.

La cimentación antigua, con 222 m<sup>2</sup>, transmitía una presión al suelo de 900 kPa, aproximadamente, y estaba compuesta de ladrillos. Esto a su vez descansaba sobre una masa cuadrada de piedra, con siete pantallas de pilotes, con 1.5 m de longitud fijados en un estrato de arcilla arenosa compactada (*caranto*) (Colombo y Colleselli, 1996).

## Soluciones

La nueva cimentación fue ampliada a 407 m<sup>2</sup>, reduciendo la presión transmitida al suelo a aproximadamente 400 kPa. Para tal se hincaron 3,076 pilotes, con 25 cm de diámetro en

promedio, y con longitudes entre 4 y 7.6 m. Las cabezas de los pilotes fueron aplanadas y los intersticios rellenos con cemento y grava. Para proveer resistencia al corte entre las dos cimentaciones, la nueva y la antigua, se colocó una reja formada por tablonces de roble, arreglados de tal forma que algunos de ellos penetraban la cimentación antigua y la sobrepasaban. Finalmente, se colocó un nuevo conjunto de piedra cuadrada del mismo tipo que las de la masa antigua (Colombo y Colleselli, 1996).



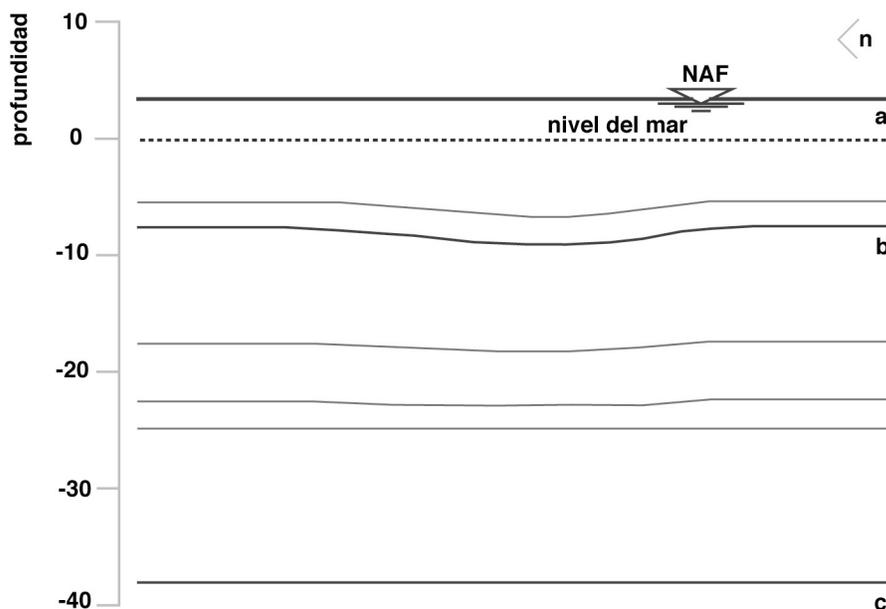
El Campanario, después de derruido, permanece, tal cual como lo construyeron en el siglo XVI.

**Figura 4.28. El Campanario en la actualidad.**

Hasta el momento, el Campanario se ha mantenido estable. Se puede afirmar con elevada seguridad que la solución adoptada fue efectiva principalmente porque en los años de reconstrucción del Campanario ya se tenían los conocimientos y técnicas adecuadas para realizar una buena intervención. Por lo demás, dado que se exigió la reconstrucción del monumento tal como era antes, se aseguraron de que ¡esta vez no caería!

## 4.4. torre de pisa, italia

El perfil típico del subsuelo bajo la Torre de Pisa consiste en tres horizontes distintos (Ovando y Santoyo, 2003) que se pueden observar en la figura 4.29, y que están descritos en la tabla 4.3.



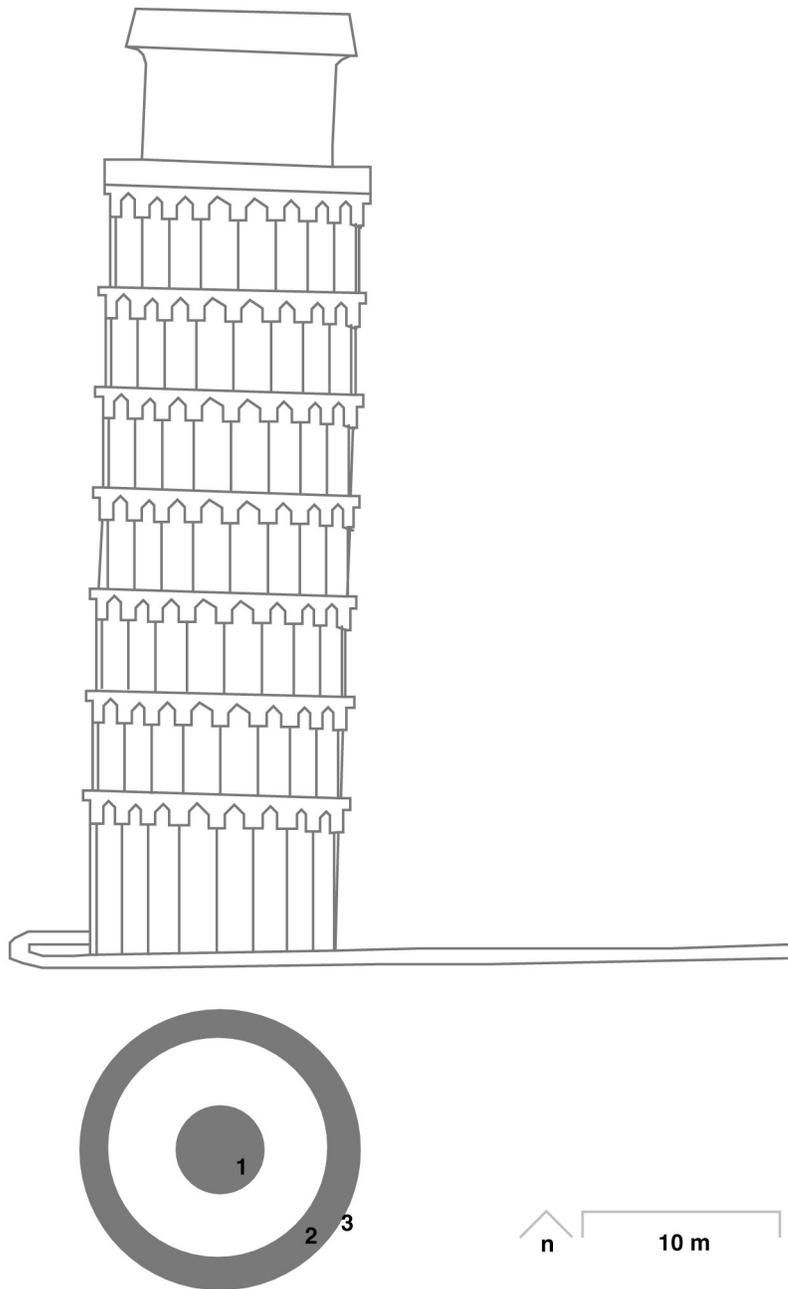
a-c. estratos de suelo

Figura 4.29. Corte geotécnico bajo la Torre de Pisa.

estrato	profundidad	descripción
a	0.0 m – 14.0 m	depósitos estuarinos en donde se encuentran limos arenosos y arcillosos variables, que subyacen una capa superior de arena con aproximadamente 2 m de espesor
b	14.0 m – 40.0 m	arcillas, que se subdividen en cuatro estratos distintos: superior, de arcilla blanda sensitiva, localmente conocida como <i>Pancone</i> ; un estrato de arcilla más rígida; un estrato de arena; e inferiormente, una arcilla normalmente consolidada
c	más de 40.0 m	arena limosa densa

Tabla 4.3. Secuencia geotécnica de la Torre de Pisa.

El nivel freático se encuentra en el estrato a, entre 1 y 2 m debajo de la superficie del suelo. El bombeo desde el estrato arenoso inferior ha resultado en un flujo descendente, provocando una distribución de la presión de poro en el estrato superficial ligeramente inferior a la hidrostática.



1. escalera 2. relleno de piedra y mortero 3. revestimiento de mármol

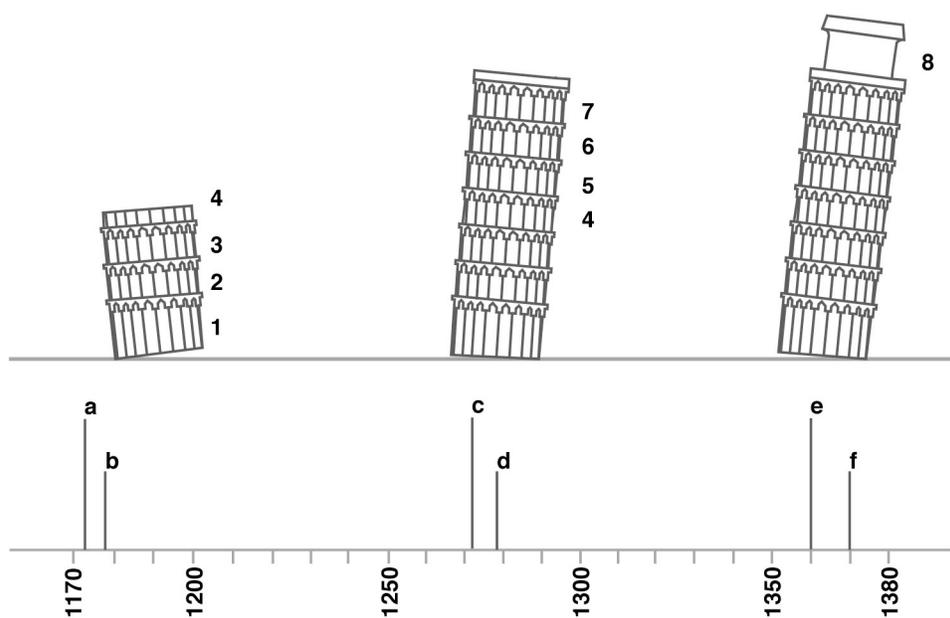
**Figura 4.30. Alzado y sección transversal de la Torre de Pisa.**

Arquitectónicamente, la Torre de Pisa tiene la forma de un cilindro hueco; ambas superficies interior y exterior están revestidas con mármol, quedando el anillo entre dichas superficies relleno con piedras y mortero; dentro del cilindro hueco existe una escalera en espiral (Fig. 4.30). El edificio posee 60 m de altura, su cimentación mide 19.6 m de diámetro, y el peso total es de 141.8 MN (Burland, Jamiolkowski y Viggiani, 2003).

Al comenzar el año de 1990, la cimentación de la Torre estaba inclinada hacia el sur, aproximadamente  $5.5^\circ$ , y la velocidad de inclinación era de 6 a 8 arcsec/año (Burland, Jamiolkowski y Viggiani, 2003). Sin embargo, la inclinación media del eje de la Torre en relación a la vertical es menor debido a su ligera curvatura, la cual es producto de las correcciones de verticalidad que los canteros fueron haciendo durante la construcción.

## Problemas

La construcción de la Torre de Pisa empezó en agosto de 1173, y se terminó 200 años después (Fig. 4.31). Se interrumpió por primera vez en 1178 cuando se construía el cuarto nivel y se empezaba a inclinar hacia el norte. Esta interrupción de casi 100 años permitió la consolidación del suelo, por disipación de las presiones de poro de la masa arcillosa a 6 m de profundidad, evitando así una falla por capacidad de carga en los cimientos de la Torre (Ovando y Santoyo, 2003). En 1272 se reanudan los trabajos y poco tiempo después la torre se empieza a inclinar hacia el sur. En 1278, cuando se termina el séptimo nivel, las obras volvieron a interrumpirse, ya que la inclinación seguía aumentando, llegando a  $1.6^\circ$ . Esta nueva suspensión duró 82 años, y al reanudarse nuevamente los trabajos en 1360 la obra se concluye con la construcción del octavo piso y del campanario que remata la Torre (Burland, Jamiolkowski y Viggiani, 2003).



- 1-8. niveles de la torre  
 a. inicio de la construcción, 1173   b. interrupción de las obras, 1178  
 c. reanudan las obras, 1272   d. interrupción de las obras, 1278  
 e. reanudan las obras, 1360   f. término de las obras, 1370

**Figura 4.31. Fases de construcción de la Torre de Pisa.**

Es importante mencionar que en 1838, el arquitecto Alessandro della Gherardesca descubrió la parte inferior de la torre para exponer los plintos de las columnas inferiores, y construyó un

cuenco de concreto con 70 cm de espesor. A esto se le designa *catino*, y en el lado norte tiene menor altura, comparado con el sur que tiene 1.7 m de profundidad. Esta descarga implicó un incremento en la inclinación de la torre (Ovando y Santoyo, 2003).

Debido a la elevada altura del nivel freático, en 1934 se perforan 361 barrenos en la mampostería de la cimentación para inyectar 80 t de lechada de cemento con el objetivo de impermeabilizarla, pues el agua continuaba fluyendo desde su base; estas perforaciones produjeron un aumento súbito de la inclinación de 31", equivalentes a un hundimiento de 2 cm en el lado sur de la Torre. Otras intervenciones de poca monta que ocurrieron en 1953 y 1966 incrementaron de igual manera la velocidad de inclinación. Al finalizar la década de los sesenta y principiar la de los setenta, el bombeo de agua para suministro doméstico en la ciudad de Pisa abatió el nivel piezométrico en la zona que circunda la torre, con lo cual la tasa de inclinación aumentó drásticamente; cuando se suspendió el bombeo, la inclinación había aumentado 41". Finalmente, en el año de 1985 se indujeron aumentos en la velocidad de inclinación producidos por nuevos barrenos perforados en la mampostería de la cimentación, esta vez para efectuar sondeos geotécnicos (Ovando y Santoyo, 2003).

## Soluciones

En agosto de 1993 se empezó a colocar lastre, constituido por grandes bloques de plomo (Fig. 4.32).

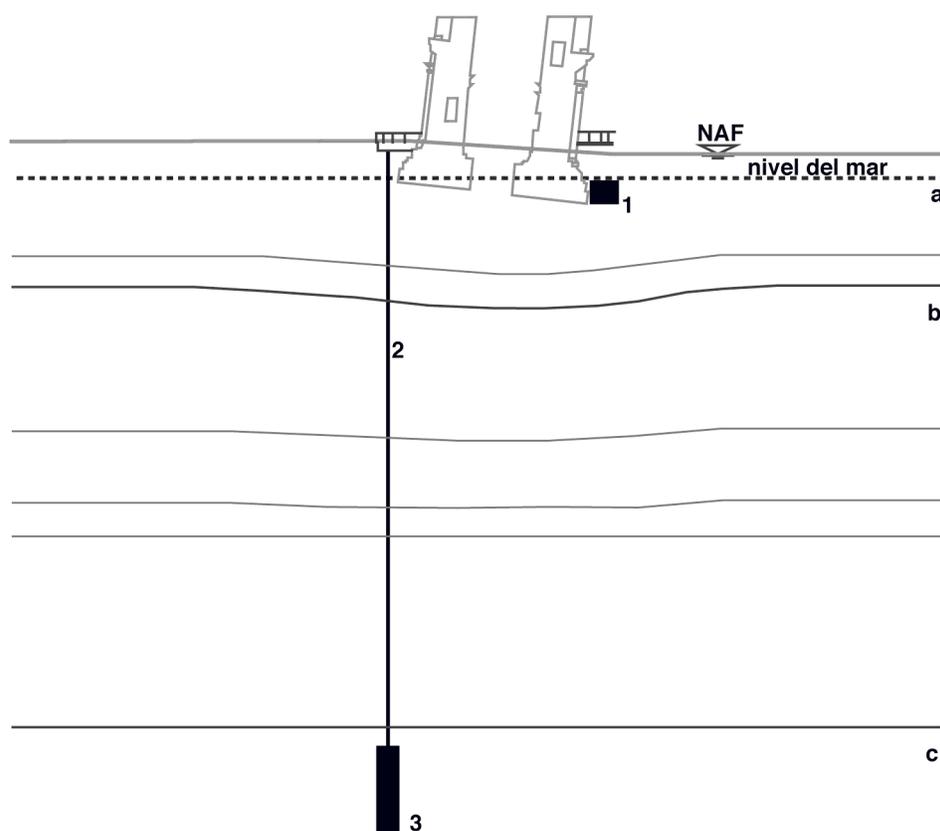


El lastre es una medida que, visualmente, es altamente obstructora. El monumento pierde mucha identidad y belleza con la colocación de bloques de plomo gigantescos en su fachada.

**Figura 4.32. Lastre en la Torre de Pisa.**

En 1994 se habían colocado 600 t de contrapeso, de las 1400 calculadas con un margen de seguridad adecuado. Desde junio de 1993 a febrero de 1994, el campanario se desplazó hacia el norte cerca de 2.5 cm, equivalentes a una corrección de 0.045% en el desplomo (Burland, Jamiolkowski y Viggiani, 2003). Probada la efectividad del lastre se decide dejarlo por un mayor lapso de tiempo para la estabilización definitiva, pero por razones estéticas, los contrapesos no fueron aceptados como solución permanente.

Delante la imposibilidad de uso del lastre, se decidió recurrir a una medida temporal sustituyéndolo por 10 cables anclados en las arenas firmes a una profundidad de aproximadamente 45 m (Fig. 4.33).



1. anillo de concreto pos-tensionado 2. cable tensionado 3. ancla

**Figura 4.33. Esquema de anclas temporales.**

A medida que se aumentaba la tensión en los cables, se iban removiendo los bloques de plomo. Estas anclas tenían que reaccionar contra un anillo de concreto alrededor de la cimentación de la Torre, lo que implicó excavar por debajo del *catino* en el lado sur del monumento, en donde el nivel freático es alto.

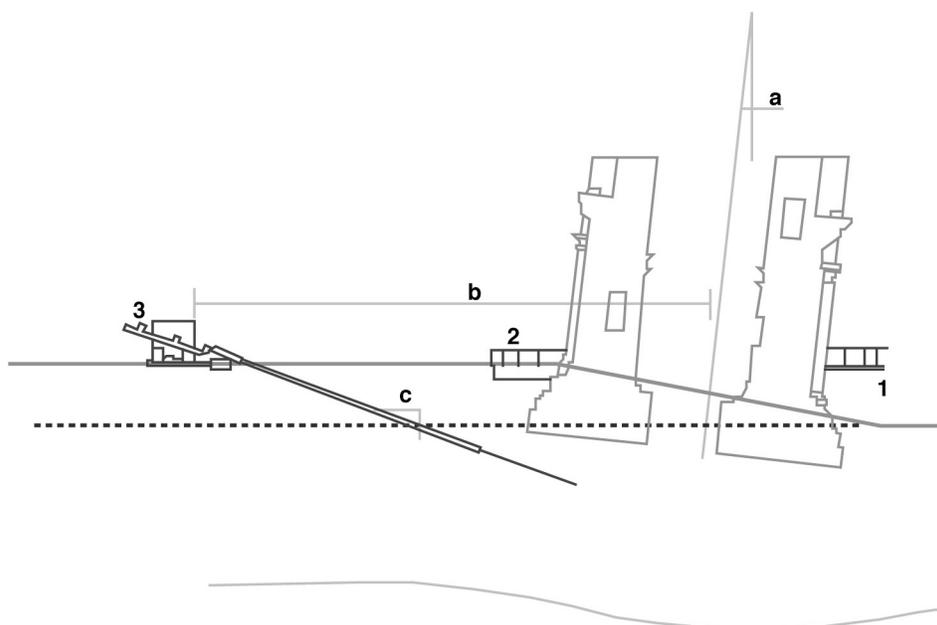
En este momento se decidió congelar el suelo; el proceso se inició en el lado norte de la Torre y esas secciones fueron exitosamente instaladas. La operación consistió en 36 horas de

congelamiento continuo usando nitrógeno líquido, seguido de la fase de mantenimiento en donde se congelaba el suelo durante una hora al día. En septiembre de 1995 (que actualmente es conocido como el “Septiembre Negro”) se inició el mismo proceso en el lado sureste y suroeste de la cimentación. Durante las primeras 30 horas de congelamiento continuo no se observó ninguna rotación de la cimentación; pero, cuando se detuvo la operación para la fase de mantenimiento, la Torre empezó a rotar hacia el sur a una velocidad aproximada de 4 arc segundos por día. La operación se suspendió y se controló el movimiento con lastre en el lado norte.

Se estudió también la posibilidad de uso de la electro-osmosis. El arreglo geométrico usado fue la instalación de electrodos de la misma polaridad a lo largo de arcos concéntricos y a una dada profundidad. Los electrodos consistían en tubos de hierro con diámetro exterior igual a 40 mm, colocados en la arcilla *Pancone*. El experimento consistió en aplicar un voltaje constante a los electrodos y medir el volumen de agua removido desde el suelo y la presión de poro, potencial eléctrico, temperatura y desplazamientos. Los objetivos del experimento fueron: cuantificar el exceso de presión de poro inducido por la corriente; evaluar la magnitud de los asentamientos alcanzados por medio de la electro-osmosis y su importancia para la reducción de la inclinación de la Torre; investigar la velocidad del fenómeno; evaluar la influencia del suelo permeable del horizonte a (arena superior); investigar el efecto del método en las propiedades mecánicas de la arcilla; estudio del área de influencia del fenómeno (Jamiolkowski et al, 1999). La medida fue abandonada debido a las desventajas del método, mencionadas en el capítulo anterior (inciso 3.8).

Finalmente se probó la subexcavación (Fig. 4.34). Con la finalidad de observar la respuesta del monumento, se realizó una intervención preliminar limitada y localizada. Esta consistió en 12 perforaciones para extraer el suelo del estrato a, en el lado norte de la cimentación de la torre, y hasta una profundidad máxima de 1 m por debajo de ella. Con esto se logró disminuir la inclinación y se verificó la viabilidad de la subexcavación como medio para estabilizar permanentemente el edificio.

La subexcavación final se llevó a cabo entre febrero de 2000 y de 2001. En esa ocasión se realizaron 41 perforaciones y se atingió el propósito inicial: disminuir la inclinación de la Torre de Pisa (Burland, Jamiolkowski y Viggiani, 2003).



a. inclinación de la torre igual a  $5^\circ$  b. distancia del equipo de perforación a la torre igual a 26 m c. inclinación del equipo de perforación igual a  $22^\circ$   
 1. catino 2. lastre 3. equipo de subexcavación

**Figura 4.34. Localización de los tubos para extracción del suelo en la Torre de Pisa.**

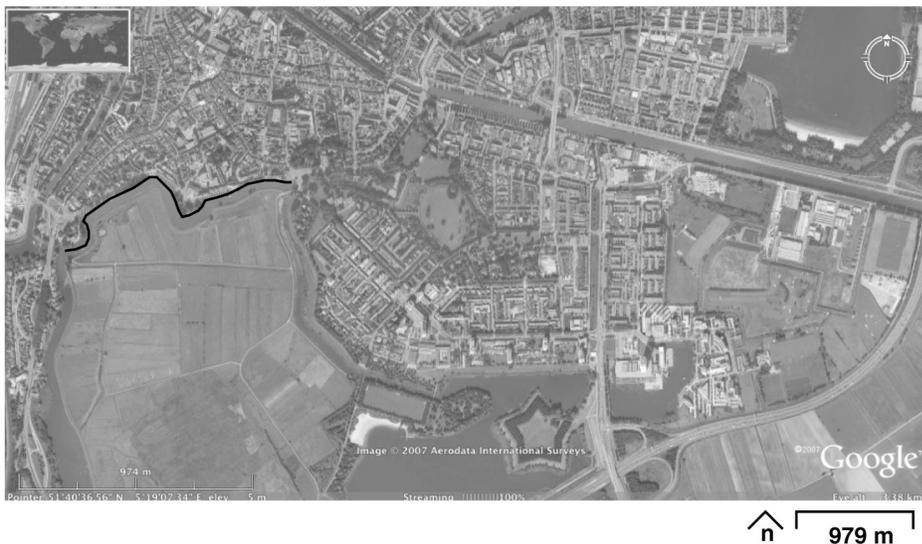
La estabilización de la Torre de Pisa fue un desafío muy grande para la ingeniería geotécnica. El monumento está cimentado sobre un suelo altamente compresible y su inclinación se ha incrementado inexorablemente a lo largo de los años hasta el punto en que se acercó peligrosamente a la inestabilidad. Cualquier disturbio en el suelo bajo el lado sur de la cimentación es muy peligroso; por ello el uso de procesos geotécnicos convencionales en el lado sur, como por ejemplo una recimentación, inyección, etc., envolvían riesgos inaceptables (Burland, Jamiolkowski y Viggiani, 2003). La técnica de la subexcavación providenció un método ultra-ligero de incrementar la estabilidad de la Torre lo cual es completamente consistente con los requisitos de la conservación arquitectónica.

#### 4.5. muro romano de hertogenbosch, holanda

Debido a su posición estratégica, la ciudad de Hertogenbosch, en el sur de Holanda, fue habitada por los romanos que construyeron un muro de mampostería para defensa de sus habitantes. Desde la Edad Media dicho muro ha sido reforzado y extendido con la colocación de nuevas capas de mampostería, con contrafuertes en algunas zonas, y más tarde con un terraplén detrás del muro hecho con arena y un material de relleno.

La fortificación romana ha constituido la más importante demarcación entre el centro histórico y las regiones exteriores (desarrolladas por el crecimiento natural de cualquier ciudad). La

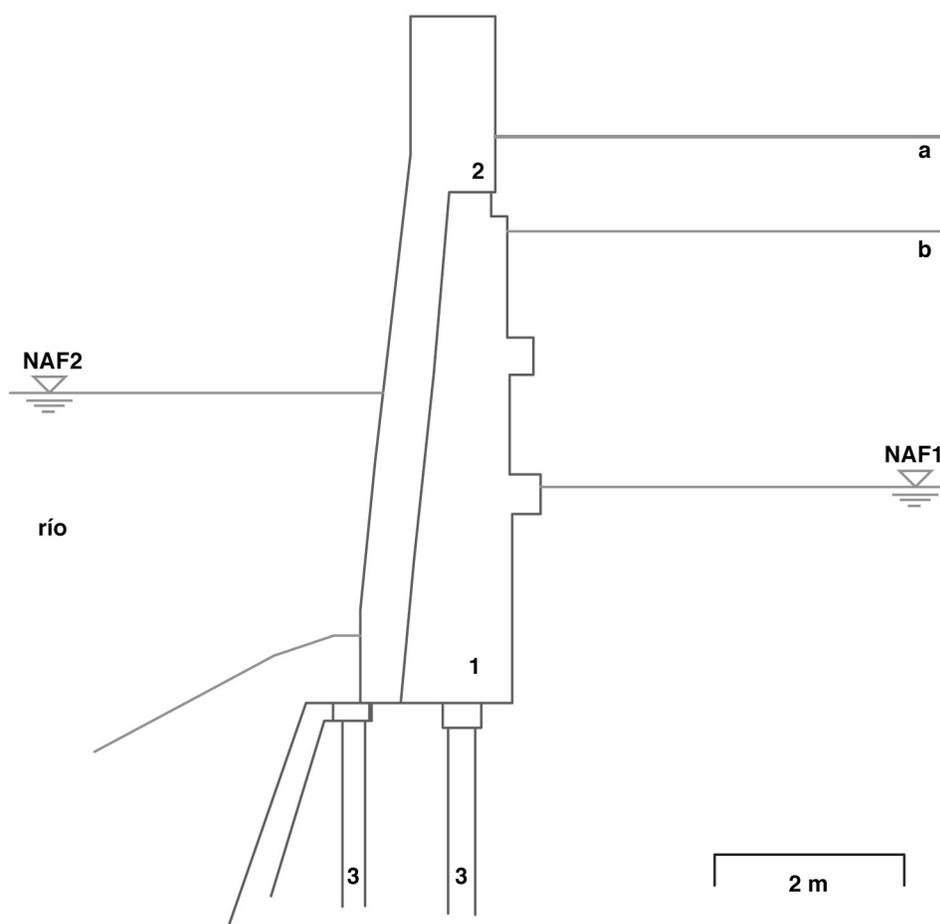
restauración del muro (Fig. 4.35) gana fuerza porque se necesitaba reinstalar, tanto cuanto posible, el contraste entre la ciudad interior y lo circundante. Por lo demás, los muros constituyen una ruta ecológica extremadamente interesante; las ramblas acomodan todo tipo de plantas, por lo que la restauración debería asegurar que la vegetación se pudiera establecer en la mampostería, mas sin permitir que la naturaleza se sobrepusiera a la cultura histórica del lugar. Por eso se hizo necesario equilibrar la flora y la fauna, así como la conservación física de la fortificación.



La línea más fuerte es la zona del muro romano que presentaba más degradación, y por ello la que estuvo sometida a restauración.

**Figura 4.35. Localización de la zona del muro sujeta a intervención.**

Por detrás del muro, se encontró un relleno que varía en espesor y profundidad, y consiste en depósitos de arena, cascajo y tierra arcillosa ligera; le subyace una arena competente a aproximadamente 1.0 m de profundidad (Fig. 4.36). El nivel freático en la zona interna del muro se encuentra a 3.7 m de profundidad; a su vez, el nivel del agua más bajo en la zanja delante del muro se mantiene a una profundidad de 2.7 m, lo que conduce a una diferencia del nivel del agua no mayor a 1 m, por detrás y delante del muro (Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib, 2005).



- 1. muro antiguo, construido en la época romana
- 2. nuevas capas de mampostería, colocadas en la época moderna
- 3. cimentación del muro con pilotes de madera
- a. depósitos de arena, cascajo y tierra arcillosa ligera b. arena
- NAF1. nivel freático detrás del muro
- NAF2. nivel freático delante del muro

**Figura 4.36. Condición geotécnica en el muro.**

## Problemas

La preparación del plan de restauración del muro romano empezó en 1996, cuando la firma de ingenieros consultores, Witteveent Bos, diseñó el “Plan para la Restauración de las Fortificaciones”. Las inspecciones llevadas a cabo en ese entonces revelaron la necesidad de la recuperación del monumento.

El gran problema que afecta al muro romano es la degradación de la cimentación y de la mampostería que lo constituyen. Asimismo, se decidió restaurarlo considerando que, una de las condiciones importantes en ese proyecto era preservar el ecosistema que se desarrolló a lo largo

del tiempo, sin interferir con las infraestructuras existentes (tráfico, conexión de cables, etc.), ni tampoco con la vegetación (como raíces de árboles) por detrás del muro.

## Soluciones

El principal objetivo de la restauración fue reforzar la mampostería del muro, sin reemplazo o cambio sustancial, y a la vez, realizar una estructura de cimentación durable para la obra monumental. Después del análisis de los posibles riesgos de intervención, se llegó a una solución novedosa de anclajes (Fig. 37). La filosofía del método consistió en formar una masa de tierra con soporte propio, sin la necesidad de reforzar la mampostería frágil e inaccesible, que se encuentra bajo el suelo o el nivel del agua (Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib, 2005).



Se observa que el equipo de anclaje no toca el muro; solamente lo refuerza con la menor intervención posible.

**Figura 4.37. Equipo de anclaje del muro romano.**

Finalmente, la técnica de anclaje del muro produjo un decremento de los esfuerzos laterales en el respaldo de la estructura de mampostería frágil. Con el fin de aumentar la fricción entre las anclas y el suelo, aquellas se inyectaron con cemento agregado de una sustancia con propiedades de retención de agua muy elevadas. El contenido químico de la mezcla de inyección fue tal, que el PH del ambiente no cambiara.

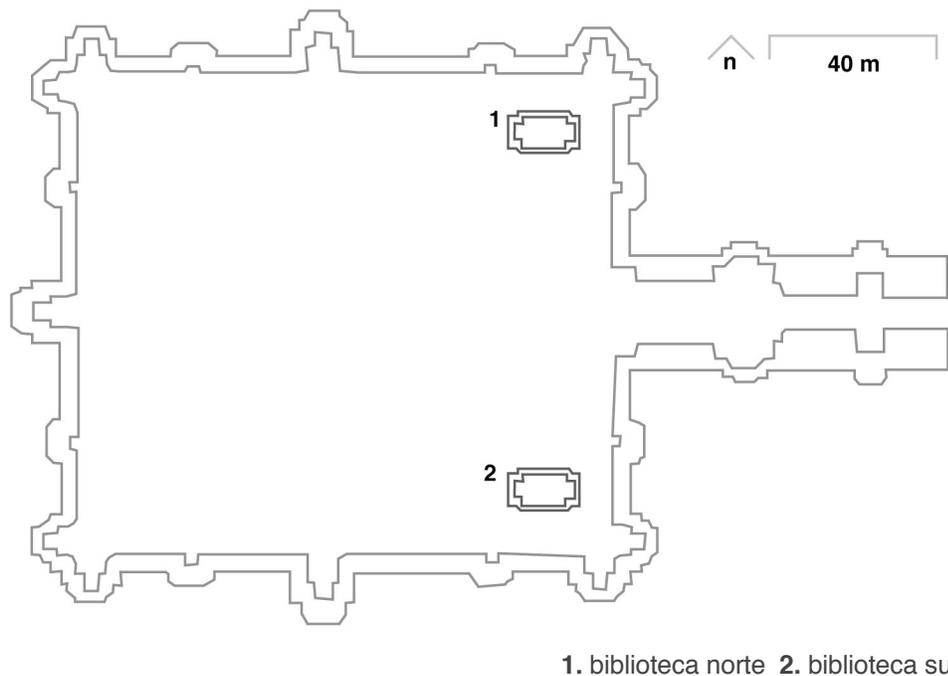
Después de que el muro recuperó su resistencia, la intervención se completó con el mejoramiento de la cimentación lo cual se realizó en secciones máximas de 5 m. Primeramente, se construyó un tablestacado auxiliar a una distancia de aproximadamente 2 m desde el frente del muro; entre el tablestacado y el muro, se excavó el suelo bajo el agua. Luego se coló una losa de 0.8 m de espesor con concreto subacuático. Después del endurecimiento de la losa, se bombeó el agua entre el tablestacado y el muro, quedando el espacio seco para que se pudiera reemplazar la mampostería y colocar nuevo mortero. Después de esto, la excavación fue rellenada y el nivel del agua regresado al original. El tablestacado auxiliar fue cuidadosamente retirado después del término de los trabajos (Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib, 2005).

La solución adoptada para la recuperación del muro de la ciudad holandesa, recurriendo a un anclaje del suelo novedoso, dio la posibilidad de un impacto del ambiente bajo desafiando la ingeniería en áreas urbanas (Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib, 2005).

## 4.6. templo bayón de angkor thom, camboya

La zona arqueológica de Angkor Thom, localizada 25 km al norte del gran lago de Tonle Sap, en Camboya, se empezó a construir en el final del siglo XII y se terminó durante el reinado de Jayavarman VII, concebido al estilo budista, y conocido por sus 54 torres y cerca de 200 enigmáticas caras sonrientes.

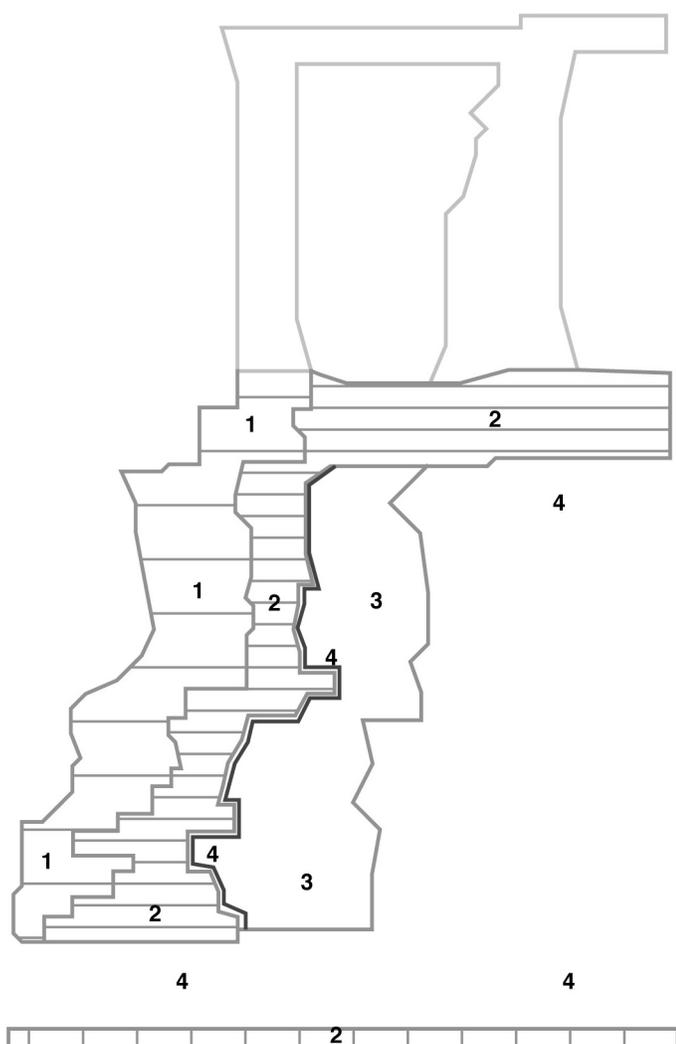
La ciudad real tiene, aproximadamente, un área cuadrada de 3 km de lado, cercada por un muro de 9 m de altura y por una zanja con agua. En el centro de Angkor Thom está el Bayón, que fue templo de Jayavarman VII, con paredes cubiertas de relieves mostrando escenas de la vida del rey y del pueblo. Dentro del templo Bayón existen dos edificios de mampostería, independientes, a los cuales se designa simbólicamente por biblioteca norte y sur (Fig. 4.38).



**Figura 4.38. Localización de las bibliotecas en el Templo Bayon, Angkor Thom.**

En la biblioteca norte se realizaron trabajos de exploración, con la finalidad de descubrir su cimentación. Bajo el templo, se encontró una camada de bloques de laterita, y otra a 2 m de profundidad en relación a la superficie (Fig. 4.39). La cimentación de la biblioteca está compuesta por un suelo arenoso bien compactado, con una resistencia a la penetración del cono ( $q_c$ ) igual a 2.0 MPa; el valor de SPT (N) se estima aproximadamente igual a 20 (Iwasaki, 2005).

El nivel freático en la zona, durante la estación de lluvias se encuentra en la superficie, y durante la estación seca llega a bajar hasta los 5 a 6 m de profundidad. Es de notar que el valor de SPT en la estación seca es mayor que en la estación húmeda, debido al efecto de humedecimiento y secado del suelo superficial.



1. arenisca 2. bloques de laterita 3. suelo arenoso con boleas  
4. suelo arcilloso

**Figura 4.39. Corte de la cimentación en el lado oeste de la biblioteca norte.**

## Problemas

En los años 30 del pasado siglo se restauró exitosamente el templo Banteai Srei, ubicado en la misma zona monumental, por medio de una técnica designada anastilosis, que significa en griego "re-erección de columnas". Al aplicar la misma técnica en otras estructuras de Bayón, resultaron asentamientos y aun falla de algunas estructuras (Iwasaki, 2005).

Debido a esas complicaciones, en 1950 empezaron los trabajos de restauración en el templo de Bayón; en particular, la biblioteca norte se encontraba severamente dañada (Fig. 4.40). El techo

se estaba cayendo, lo que podría haber sido causado por los grandes desplazamientos de los muro y columnas (Iwasaki, 2005).



1. vista de la biblioteca norte del Templo Bayon 2. columna apuntalada debido al precario estado de conservación

**Figura 4.40. Biblioteca norte del templo antes de la restauración.**

Con base en algunas mediciones se llegó a la conclusión de que dichos movimientos de la estructura eran causados por asentamientos de las cimentaciones. Por lo demás, las observaciones de fisuras y grietas de la mampostería del lado norte y sur del monumento, probaron que la inestabilidad del templo se debía a problemas en la cimentación (Iwasaki, 2005). Dichos asentamientos fueron provocados por el deslizamiento de los bloques de laterita dentro de las piedras de arenisca, y consecuente flujo hacia el exterior del relleno compactado que constituía la cimentación, todo esto provocado por los cambios de cargas a nivel de la superestructura, y por las infiltraciones de agua en época de lluvias.

## Soluciones

La solución adoptada fue el desmantelamiento de parte de la cimentación del monumento, y consecuente sustitución por otro material (Iwasaki, 2005). Dicho material de relleno fue una mezcla de limo suelto, la cual aunque no desarrolle una resistencia tan elevada como una de suelo-cemento, es químicamente más estable.

Fue la primera vez que se aplicó en Angkor la ingeniería geotécnica moderna. Los principios geotécnicos fueron útiles para determinar la calidad necesaria del relleno de suelo y para seleccionar el material de suelo apropiado y los métodos para construir la cimentación de la estructura (Iwasaki, 2005). El material usado y los métodos desarrollados no son los mismos que

los antiguos ingenieros de Khmer usaron. Aquí se usó casi el mismo material y le adicionaron limo suelto para cubrir la escasez del material original.



1. vista de la biblioteca norte del Templo Bayon 2. columna totalmente restaurada

**Figura 4.41. Biblioteca norte del templo después de la restauración.**

Hasta la fecha la medida parece haber sido satisfactoria (Fig. 4.41). La decisión de preservar las zonas de la cimentación que se mantenían en buen estado respetó sobremanera al monumento. El material de sustitución fue estudiado detalladamente y probó ser adecuado y lo más similar al original, lo que se armoniza, en muchos aspectos, con la correcta práctica profesional en la restauración de obras con valor histórico como es el caso de Angkor, patrimonio de la humanidad desde 1992.

## 4.7. big ben, londres, inglaterra

El Gran Reloj de Westminster está formado por la Torre del Reloj y por la Gran Campana de Westminster. El monumento, conocido como Big Ben (Fig. 4.42), se encuentra en la esquina noroeste del edificio que alberga la sede de las dos Cámaras del Parlamento Británico.

Todo el complejo fue diseñado en 1858 por Charles Barry, después del incendio de 1834 en el Palacio de Westminster. El Big Ben fue realizado en estilo gótico victoriano, con una altura total de 96.3 m. El cuerpo principal del edificio, con 61 m de altura, consiste en un enladrillado con revestimiento en piedra; los 35 m restantes coronan la torre con una pirámide de hierro fundido, con base cuadrada de 15 m de lado.



Los picos del complejo monumental queriendo elevarse en el horizonte, pero corriendo el riesgo de bajarse por las construcciones subterráneas.

**Figura 4.42. Vista del Palacio de Westminster y de la Torre del Reloj desde el puente de Westminster.**

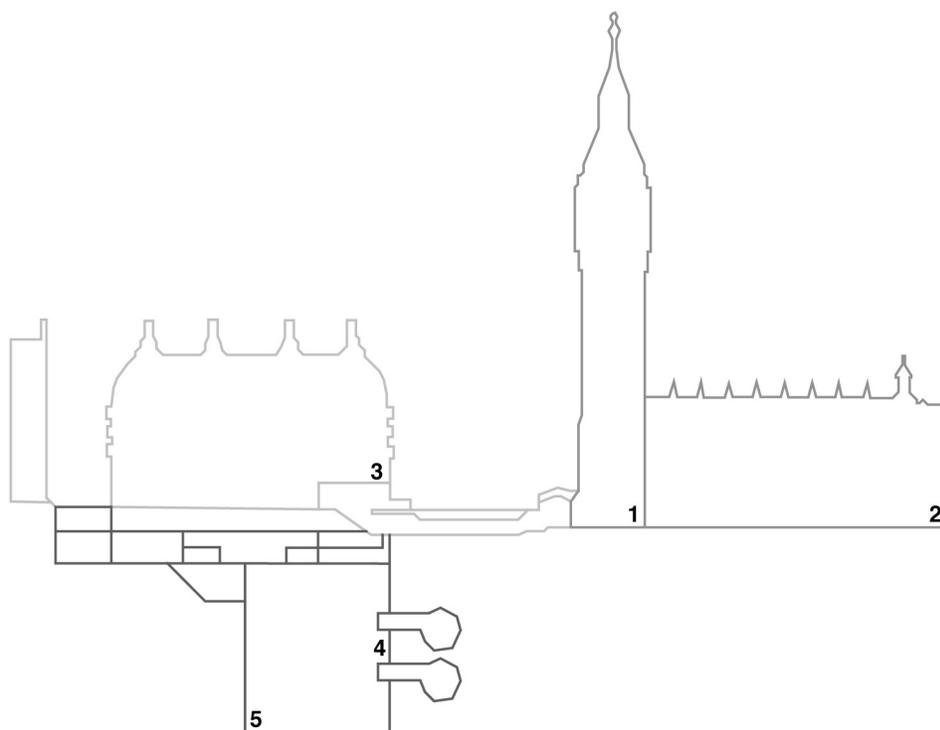
Estructuralmente, la torre está conectada al cuarto piso de la Ala Este del Palacio de Westminster. Posee una cimentación de concreto, con 15 m de lado y espesor de 3 m. El peso total de la estructura es de 8,400 t, transmitiendo al suelo una presión de aproximadamente 400 kPa (Burland, 2002).

El suelo de cimentación de la torre es la famosa Arcilla de Londres. Esta fue formada por un depósito marino del Período Eocénico (hace cerca de 40 millones de años), que se cree haber sobrepasado los 100 m de espesor. Gran parte de aquel depósito, y su recubrimiento, fueron erosionados hace cerca de 1 a 2 millones de años atrás. Actualmente, la zona superior es constituida por la "arcilla café", que se encuentra finamente agrietada, ya que fue oxidada por meteorización; bajo esta capa se halla la "arcilla azul", más resistente y menos agrietada (Matos Fernandes, 1995). El nivel freático en la zona se encuentra muy próximo de la superficie.

## Problemas

La construcción de la Estación de Westminster del Underground de Londres, como parte del proyecto de Extensión de la Línea Jubilee (JLE), fue estudiada a fondo ya que podría interferir con las edificaciones en la superficie. Efectivamente, se concluyó que aquellos trabajos producirían movimientos significativos en la Torre y en el Palacio de Westminster.

Dicha estación está constituida por dos túneles, con diámetro exterior igual a 7.4 m, ubicados verticalmente, uno superior al otro, bajo la calle Bridge a profundidades de 21 y 30 m; paralelamente a esos túneles, el proyecto preveía la construcción de una caja subterránea para albergar las escaleras de acceso, hasta una profundidad de 39 m (Fig. 4.43) (Burland, 2002).



1. Torre del Reloj, Big Ben 2. Palacio de Westminster 3. Casa Porticulus, nuevo edificio parlamentario 4. Caja de escaleras de la estación JLE 5. Plataformas de los túneles JLE

**Figura 4.43. Sección transversal en la estación Westminster y la Torre Big Ben.**

## Soluciones

La solución adoptada para prevenir la interacción entre la construcción de la nueva estación del Underground y los monumentos adyacentes, fue la inyección de compensación (Burland, 2002), en México conocida como inyección de morteros. Debido al estado de esfuerzos del subsuelo londinense, es decir el esfuerzo horizontal es prácticamente tres veces superior al vertical debido al grado de preconsolidación de la arcilla, las láminas formadas por el mortero son horizontales y funcionan como un refuerzo del subsuelo; se podrían ver como inclusiones rígidas horizontales.

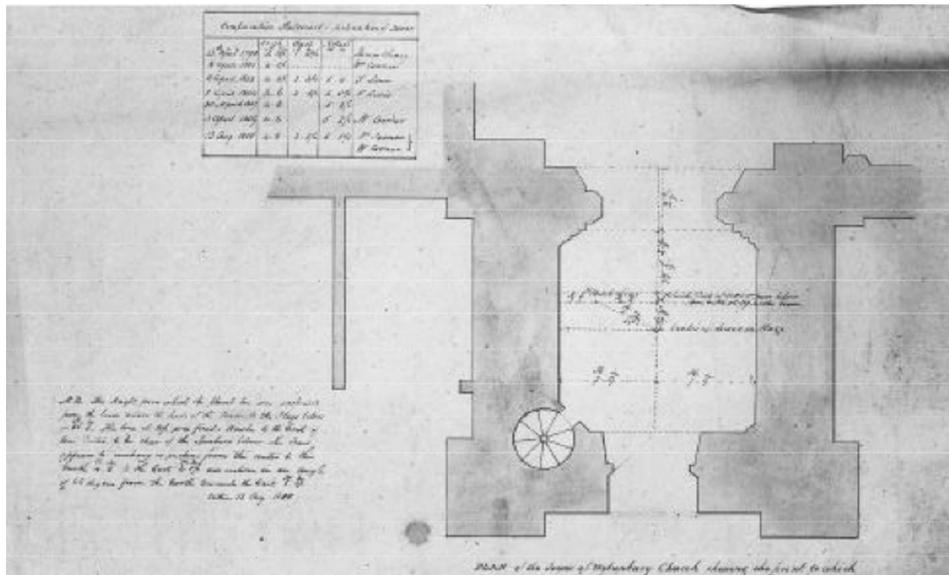
La técnica consistió en inyectar al suelo mortero a presión, en zonas específicas, y teniendo en cuenta los hundimientos que la torre monumental pudiera experimentar. Para ello, bajo las cimentaciones, y con un espaciado máximo de 2.5 m, se instalaron 16 tubos de acero (en este caso, " tubes à manchettes", o tubos de manguitos) con ranuras en intervalos regulares; cada ranura posee una pequeña funda de hule que actúa como una válvula unidireccional, permitiendo que la lechada sea bombeada solamente hacia el exterior (Burland, 2002).

Entre 1996 y 1997, se realizó un total de 24 sesiones de inyección, sumando un volumen igual a 122 m<sup>3</sup> de lechada. Con esto se alcanzó una compensación de la inclinación aproximadamente igual a 100 mm (Burland, 2002).

Al final de los trabajos se concluyó que, el uso de la inyección de compensación en el control de la inclinación del Big Ben, durante la construcción de la estación JLE Westminster, tuvo bastante éxito, y mostró que los movimientos de las edificaciones por medio de esta técnica pueden ser controlados dentro de tolerancias muy aceptables.

## 4.8. sant chad, wybunbury, inglaterra

La torre Sant Chad (Fig. 2.11), ubicada en la población de Wybunbury, en el sur de Cheshire, Reino Unido, data del siglo XV y es una de las pocas construcciones de ese entonces que todavía sobrevive. Desde el año 700 d.C., aproximadamente, Wybunbury asistió a la erección de muchas construcciones religiosas, no obstante, durante los siglos XVI a XX, muchas de aquellas han sido demolidas debido a la inestabilidad del subsuelo (solo por enumerar algunas: 1595, 1793, 1833, 1892 y 1977).



Dibujo del plano de la torre, realizado por Trubshaw cuando lo encargan de encontrar la solución para reducir la inclinación del monumento.

**Figura 4.44. Plano de la torre de Sant Chad.**

Este monumento tiene base cuadrada con 9.8 m de lado, y altura de 29.3 m (Fig. 4.44), transmitiendo al suelo un peso aproximado a 1,500 t. La profundidad de desplante de la cimentación original se encuentra a 1.73 m. Desde su construcción, la torre de Sant Chad había

sufrido inclinaciones, con velocidades de 5 a 10 mm/año, hacia el noroeste (Johnston y Burland, 2001).

## Problemas

En el siglo XVIII se empezó a observar el comportamiento de la torre: entre 1758 y 1790, el desplomo de Sant Chad aumentó de 0.9 a 1.05 m, hacia el noroeste. Cuarenta años después, cuando se realizaron los primeros trabajos de restauración, la inclinación de la edificación era de 1.56 m.

La razón de estas inclinaciones se explica por el hecho de que, en una ciudad cercana a Wybunbury, Nantwich, existía la industria salera del Cheshire, en labores desde los tiempos romanos hasta 1856. Estas dos ciudades están conectadas por el río Weaver. En 1971 se realizaron tres pozos a cielo abierto con la finalidad de investigar el subsuelo; en esos trabajos se verifica que la torre está cimentada sobre una arcilla rígida a una profundidad de 1.5 a 4.9 m; subyacente a esta se encuentra una arena fina; y, finalmente, a 107 m de profundidad se encuentra la parte superior de una capa con varios estratos salíferos, en un porcentaje aproximado a 80% de sal (Johnston y Burland, 2001).

Con base en las investigaciones y en el historial de la zona, se concluye que la torre es afectada por movimientos del subsuelo originados por hundimientos de estratos profundos, a su vez, ocasionados por la extracción de sal y arena, o por erosión de limos, y flujo superficial de la ladera adyacente (Johnston y Burland, 2001).

## Soluciones

El primero en aceptar la responsabilidad de estabilizar la torre de Sant Chad fue James Trubshaw en 1830, después de que otros la rehusaron. Trubshaw fue ingeniero, arquitecto y constructor, y se dio a conocer por varias obras inusitadas que realizó a lo largo de su vida. En el monumento histórico de Wybunbury realizó un pozo para extracción del suelo bajo la cimentación de la torre, para lo que no recurrió a gran maquinaria o intervenciones secretas (Johnston y Burland, 2001), al mismo tiempo que logró un mínimo de intervención posible. Actualmente, este procedimiento es conocido como subexcavación.

A pesar del éxito de los trabajos de subexcavación de Trubshaw, en enero de 1971 Sant Chad presentaba nueva inclinación de 1.04 m hacia el noroeste, la cual aumentó a 1.52 m hasta el año de 1982, por lo que la velocidad de inclinación era de 13 mm/año (Johnston y Burland, 2001).

Nuevamente Sant Chad fue sujeta a intervenciones, ahora más drásticas que los loables trabajos de Trubshaw. En 1989 se realizó una recimentación por medio de una plataforma de concreto, bajo las cimentaciones existentes, las cuales fueron reforzadas. Luego se instalaron gatos hidráulicos entre la plataforma de concreto y la cimentación existente, con lo que se logró reducir la inclinación de 1.19 a 0.46 m (Johnston y Burland, 2001).

## 4.9. comentarios finales

Los zigurat en Irán, las pirámides del Egipto y de Las Américas, las stoa de Grécia, las calles romanas, los muros de Attalus, los monumentos chinos del primer milenio, las torres italianas construidas en el inicio del segundo milenio y las grandes catedrales son algunos de los excepcionales monumentos de la humanidad, desde los cuales debemos intentar aprender para poder perfeccionar dichas estructuras que el Hombre ancló al suelo.

De los errores cometidos y de muchas de las habilidades olvidadas, tenemos bastante que aprender de la experiencia del pasado, la cual inspiró nuestra arquitectura moderna en los períodos preindustrial e industrial.

El ejemplo de Trubshaw es loable; su pericia y atrevimiento fueron los desencadenadores de una de las técnicas de corrección de hundimientos diferenciales más aplaudida en el mundo, tanto que se usó en la Torre de Pisa y en la Catedral de México.

La conservación o restauración de estructuras antiguas son en si mismas grandes desafíos debido a la complejidad geométrica de aquellas, a la heterogeneidad y a la variabilidad de las propiedades de los materiales tradicionales, al escaso conocimiento sobre las técnicas constructivas originales, a la difícil caracterización de las acciones malélicas sobre los edificios, y a la casi inexistencia de normas o instrucciones específicas que salvaguarden los técnicos responsables. Adicionalmente, las restricciones a la inspección de los edificios con elevado valor histórico, bien como, los costos elevados de esos trabajos, conducen frecuentemente a entabes en la labor de mantener vivo el legado que nos fueron dejando los pueblos esparcidos por todo el mundo.

## teoría del arte invisible



La construcción del mayor anfiteatro del Imperio Romano data del 70 d.C. Ahí se celebraron juegos hasta el siglo VI; después de la Edad Media fue utilizado como refugio, fábrica, sede de una orden religiosa, fortaleza, cantera y santuario cristiano. A lo largo de su vida, la estructura fue seriamente dañada por sismos y picapedreros. A pesar de todo, es uno de los ejemplos mejor conservados de la arquitectura romana.

**Figura 5.1. Coliseo de Roma, Italia.**

## 5.1. consideraciones iniciales

La restauración de objetos data desde los inicios de la humanidad, aunque es a partir del siglo XIX que esa actividad se considera como pública y profesional. Durante la Edad Media (siglo V a XV) y el Renacimiento (siglo XV a XVI) las labores de restauración eran realizadas por artesanos, pero con la valoración del término “artista” se comenzó a delegar este tipo de trabajos a artesanos marginados; desde ese entonces surge la noción de que “un mal pintor se dedica a la restauración”.

Es también desde el siglo XIX que se empiezan a desarrollar un cúmulo de teorías y escuelas sobre la restauración de monumentos, de las cuales surgieron varios criterios válidos pero no universales. Dichas teorías se centran en los “bienes de interés cultural”, como se designa modernamente al patrimonio histórico, los cuales incluyen iglesias, catedrales, castillos, palacios, etc., conjuntamente con la arquitectura rural tradicional, y todas las construcciones que con el paso del tiempo han adquirido un valor mayor al originalmente asignado.

A pesar de toda la atención dada a la superestructura monumental, se dejó caer en el olvido el arte de construcción escondido, la arquitectura invisible: ¡las cimentaciones! Los historiadores, escritores, etc. siempre se preocupan por el descubrimiento de las raíces de grupos étnicos, familias e individuos; sin embargo, es igualmente interesante buscar, entender y conservar, las raíces de las grandes construcciones humanas, admirar la astucia de los constructores antiguos y su relación con la tierra que soporta sus obras (Kerisel, 1987).

Después de una reflexión sobre el papel de la geotecnia en la restauración de monumentos, este capítulo presenta una propuesta para una teoría de rehabilitación orientada a la ingeniería, principalmente geotécnica, basada en lo que otros han escrito para la arquitectura y otras disciplinas que se incorporan en la labor de la restauración de monumentos. En anexo se hace una breve reseña de las primeras teorías de restauración, las cuales son la raíz de una disciplina muy en boga actualmente.

## 5.2. la geotecnia y la restauración de monumentos

Durante el siglo onceavo, en Italia así como en muchos otros países europeos, se concedieron ricas tierras a señores. Estos nuevos señoríos competían entre sí erigiendo grandes monumentos, principalmente torres y campanarios, como muestra de su poder (Kerisel, 1987). Muchas de esas construcciones colapsaron, algunas veces debido a defectos estructurales, pero en gran parte debido a la aplicación de cargas elevadas a los cimientos que se apoyaban sobre suelos aluviales. Indubitablemente la arquitectura visible era creativa, pero se dio muy poca atención a la parte invisible, tanto a nivel de proyecto como de mano-de-obra.



Dos torres de Boloña que han sobrevivido:  
Garisenda tiene una inclinación de 3.2 m  
respecto a la vertical y la Asinelli de 1.3 m.

**Figura 5.2. Garisenda (izquierda) y Asinelli (derecha) en Boloña, Italia.**

El propio Bramante, gran arquitecto del Renacimiento, se encontró con algunas sorpresas desagradables en sus obras, dado que gastó el dinero asignado para las cimentaciones en la decoración de las fachadas (Kerisel, 1987). Por esto es impresionante la enorme lista de torres y campanarios con problemas de estabilidad en Italia: Garisenda y Asinelli en Boloña (Fig. 5.2), Ghirlandina en Modena (Fig. 5.3) y la famosa Torre de Pisa (Fig. 2.5).



Con 82.12 m, la torre es el símbolo de la ciudad; es visible desde todas las direcciones en las afueras del centro urbano. Actualmente se está restaurando.

**Figura 5.3. Ghirlandina, Modena, Italia.**

En realidad, por todo el mundo existen edificios que padecen de los efectos de los asentamientos del suelo. Estos raramente son uniformes por lo que, cuando ocurren diferencialmente, implican la aparición de riesgos adicionales para el patrimonio arquitectónico. Además, existen otros fenómenos en los cuales las condiciones del subsuelo suelen ser determinantes, como temblores, inundaciones, el hundimiento regional asociado al explosivo y desordenado crecimiento de las ciudades, etc. Por estas razones y por la necesidad de encontrar soluciones, la ingeniería geotécnica aplicada a la restauración de monumentos se ha desarrollado a paso galopante.

### 5.3. postulados de la teoría del arte invisible

Las diversas teorías de la restauración existentes en la actualidad son fruto de la voluntad de los expertos en el tema para exponer sus ideas, conocimientos y experiencias y son únicamente guías para la práctica profesional. La preocupación con el testimonio histórico construido por nuestros antepasados ha conducido a la definición de criterios y recomendaciones que se forjan en las denominadas Cartas Internacionales. La primera fue publicada en 1931 en Atenas, seguida por la Carta de Venecia en 1964, y desde ese entonces han sido publicadas muchas más. Estos documentos fueron escritos por especialistas de todo el mundo, con la intención de iluminar y guiar el camino de las intervenciones en los monumentos históricos, con una base científica que hasta entonces no había sido postulada.

La conservación de monumentos históricos, además de un quehacer esteticista y romántico como lo veían en el siglo XIX, es también una labor compleja y multidisciplinaria, pues requiere de la intervención de arquitectos, historiadores, restauradores y, en muchos casos de, especialistas en estructuras, geotecnia, resistencia de materiales, y otras disciplinas de la ingeniería (Meli, 1998).

Aún con todo, en muchos casos de conservación o restauración, no existe uniformidad en cuanto a los criterios de intervención, como es el caso notorio de la práctica ingenieril, en la cual no constan teorías o conductas a tomar en cuenta en las obras de un edificio con importancia arquitectónica o cultural. Este hecho es más evidente todavía en la ingeniería geotécnica por su esencia invisible.

En el caso de esta ingeniería, no existen criterios específicos para la práctica de la restauración de obras con valor patrimonial e histórico. Sin embargo, la silenciosa labor de conservación por parte de muchos ingenieros, ha mantenido estables a una gran cantidad de monumentos. Muchos siguen alguna teoría de restauración. Otros, quizá la mayoría, no siguen teorías sino que confían en su práctica profesional, en fin... no existen pautas o directrices para la práctica ingenieril dentro de la restauración de monumentos, excepto las que se formularon dentro del ámbito de la arquitectura.

En consecuencia, conviene dar forma a los principios fundamentales en los cuales se debe basar un ingeniero geotécnico cuando llega la hora de intervenir en un bien con interés cultural, dejando que cada quien cuide de asegurar su aplicación, siempre y cuando el beneficio sea común a su propia cultura, o tradición, y a los intereses comunes de la nación.

## postulado 1 - investigación y recopilación

Para que la intervención en el monumento sea adecuada, es importante hacer uso de previo conocimiento y experiencias en otras obras, y de todas las disciplinas que contribuyen al estudio del edificio, así como de investigación detallada de la construcción, teniendo siempre presente el mantenimiento de la herencia pasada y la imagen caracterizadora del monumento, insertado en su entorno.

En el caso particular de la geotecnia, la geología es fundamental para la resolución de los problemas. Es sabido que los depósitos naturales son irregulares, pero fueron creados de acuerdo con leyes físicas, como el transporte hidráulico o la sedimentación, por lo que la historia geológica proporciona muchos datos sobre el comportamiento de los suelos. Así, la geología permite al geotécnico establecer cuales son las condiciones frontera que existen, o que puedan existir, cuando se estudia un problema específico.

Al lado de la geología, se encuentra la mecánica de materiales que es fundamental para el buen estudio geotécnico, principalmente en lo que concierne a las relaciones esfuerzo – deformación – resistencia de los materiales que constituyen el apoyo a una obra con valor arquitectónico.

Asimismo, junto con el historial artístico, arquitectónico y estructural del monumento es cardinal incluir la reseña de los esfuerzos y trayectorias de esfuerzos, con base en estudios geotécnicos del subsuelo y de la historia del sitio en donde se cimenta el edificio. En este estudio geotécnico se debe colocar especial atención en los pequeños detalles ya que estos muchas veces resultan en grandes peculiaridades del subsuelo; a grandes rasgos las condiciones en el subsuelo pueden ser afectadas por factores como el origen geológico, las condiciones climáticas e hidráulicas, las modificaciones realizadas por el hombre como la imposición de cargas en la superficie, el secado, o la extracción de agua de los estratos más profundos.

La historia de esfuerzos puede ser muy típica y sencilla, así como muy complicada, principalmente en suelos arcillosos. En primer lugar se da la consolidación primaria, la cual es ocasionada por el drenaje o salida de agua de la estructura del suelo y es una función del incremento de esfuerzos que se transmiten a la masa de suelo, como consecuencia de las sobrecargas de rellenos y del peso de los edificios; la duración de este proceso depende de la distancia que recorre el agua para encontrar dónde disipar su presión; esta pérdida de volumen de agua es la que se transforma en deformación vertical o asentamiento. Luego se da la consolidación secundaria que es un fenómeno cuyo efecto se manifiesta durante décadas y su magnitud (a pesar de ser menor) también es función del esfuerzo aplicado.

A parte de la consolidación, existen factores que desencadenan cambios de esfuerzos en la masa de suelo, de los cuales los más importantes y rápidos los induce el Hombre de manera directa o como secuela de alguna acción; por su parte la naturaleza también contribuye a incrementar las deformaciones, aunque en general sus efectos son lentos. En primer lugar se debe colocar atención a las cargas aplicadas superficialmente como simples rellenos o estructuras cimentadas someramente; en segundo se deben averiguar las cargas profundas como las transmitidas por pilotes o pilas que penetran en la masa de suelo. También la extracción de agua somera es una práctica que se realiza con carácter temporal en excavaciones pero puede convertirse en permanente cuando se trata de desalojar ese líquido de los mantos profundos ya que induce la

pérdida de presión en el agua intersticial y contribuye al hundimiento regional. Otros factores que contribuyen al cambio de esfuerzos en la masa de suelo son los mencionados en el capítulo segundo del presente escrito.

Finalmente, la conservación, restauración o rehabilitación de una obra monumental deben ser procesos metodológicos y sistemáticos insertados en un marco coherente, basados en información veraz y conocimiento cabal, seguidos de la comprensión entre las diferentes disciplinas.

## postulado 2 - análisis y desarrollo

En el proceso de análisis de la intervención sobre el monumento, se debe permitir la participación de todas las entidades con conocimiento de causa sobre el caso en estudio. El proceso de toma de decisiones debe ser iterativo, con el único afán de mantener y respetar la significación del monumento.

Durante la etapa de tratamiento de la información, es esencial tener presente que los cálculos simples basados en muchas variables se prefieren a los cálculos elaborados basados en pocos datos. Las técnicas de cálculo ingenieril actuales son útiles para evaluar la influencia, en los resultados finales, de una variable difícil de calcular, pero no son la clave para la resolución de los problemas. En la mayoría de los casos, el diseño está condicionado por una correcta evaluación de los modos posibles y probables de falla, por lo que la observación se sobrepone al cálculo exhaustivo.

Un problema geotécnico en un monumento histórico, muchas veces es fácilmente detectado, sin embargo, no se le da la solución adecuada y por ello pueden ocurrir fallas irreversibles. Una estructura construida, así como lo que la apoya, es decir la cimentación, no funcionan solamente con una serie de cargas externas e internas a aquellas, sino también con interacciones muy importantes con el suelo que le subyace. Asimismo, en la restauración de monumentos, es fundamental que se tenga el conocimiento total del problema, observando el todo y no solamente la parte que corresponde a cada especialista. Cada uno debe interactuar con los demás para que la intervención en el monumento sea la más sabia.

Siempre y cuando no puedan evitarse, conflictos, por ideologías controversiales o irreconciliables, en la hora de conservar, restaurar o reconstruir un monumento, aquellos deben ser resueltos con seriedad, buen planeamiento, administración y negociación entre las diferentes partes.

En tales situaciones, tener presente que la ingeniería geotécnica muchas veces sacrificará su arte, por el carácter invisible que posee, y por tanto, más susceptible y aceptado a sufrir intervenciones drásticas; finalmente, para el vulgo, la superestructura es considerada como "el monumento".

## postulado 3 - programa y política

Los organismos e individuos responsables por las decisiones durante una intervención en el monumento deberán ser adecuadamente identificados y serán específicamente responsables por cada una de aquellas decisiones.

La dirección y supervisión de cada etapa de intervención en el monumento también debe ser definida previamente a los trabajos, y cualquier cambio debe ser implementado por todo el grupo de personas con el adecuado conocimiento y experiencia.

Los responsables por el proyecto deben asegurarse de proveer todos los recursos necesarios y adecuados para el proceso de conservación, restauración o rehabilitación.

Tener presente que, para mantener prendida la llama de la memoria, la rehabilitación es válida, no obstante, si la función de la fábrica todavía está activa, se debe pensar primeramente en la conservación, o en la restauración.

El impacto negativo sobre la fábrica debe ser evitado a todo costo; la primera hipótesis a colocar debe ser la de no intervenir directamente sobre el monumento, y cuando se decide por el contrario, se debe actuar de la forma menos obstructora posible.

Son preferibles las técnicas y materiales tradicionales para la conservación, restauración o rehabilitación de la fábrica. En algunas circunstancias se puede hacer apropiación de técnicas y materiales modernos que ofrecen sustanciales beneficios a la intervención.

Una intervención exitosa requiere siempre de la combinación de habilidades técnicas y prácticas, y de una administración eficiente del proyecto final. En suma, el conocimiento apropiado, la habilidad y la disposición de recursos son fundamentales para un buen proyecto de conservación, restauración o rehabilitación.

### postulado 4 - intervención y práctica

En caso de que no exista información suficiente, en la cual se apoyen o justifiquen los trabajos de intervención, se debe proceder a una medida preventiva, siempre y cuando la amenaza hacia el monumento sea importante. Se recurre a una medida correctiva cuando el problema es bien conocido, las características de la fábrica se conozcan y se admite que la intervención es necesaria.

Siempre que sea posible es preferible una medida temporal para remediar el problema o amenaza al monumento, ya que su carácter reversible es siempre de más valía para lograr la autenticidad. Una medida permanente se puede usar siempre y cuando la amenaza sea fuerte y no haya forma más respetuosa de intervenir en el monumento.

La construcción, o el proceso constructivo, deben merecer mucha atención durante la etapa de diseño. Si bien generalmente se tienen en cuenta las deformaciones del edificio, muchas veces se olvidan las implicaciones que aquellas pueden tener. Las estimaciones de los asentamientos de una estructura en un centro urbano o histórico, pueden conducirnos a la conclusión de que la estructura salga dañada con una excavación por ejemplo; la interacción entre edificios vecinos, etc. nos puede conducir a tomar la decisión de recimentar la estructura. No obstante, una recimentación también puede dar lugar a asentamientos, que cuando son diferenciales y erráticos, también agrietarán mucho al monumento.

Tener presente el respeto por lo auténtico, por lo que se debe dejar clara la evidencia de la intervención. Para ello, se deberá llevar una bitácora de todos los procesos y decisiones del

proyecto de intervención en el monumento; ésta deberá basarse en los ideales de una restauración científica para lo cual se requiere:

- i. registrar la investigación previa a los trabajos de intervención
- ii. registrar los trabajos que se realizarán en el monumento
- iii. cuando se recurre al uso de fábrica nueva, distinguirla discretamente de la antigua, trazando un signo en la fábrica nueva, y procurando el equilibrio entre ambas
- iv. suprimir elementos originales en la parte intervenida, no falsificando el monumento
- v. exponer la fábrica que se haya prescindido, con fin didáctico, es decir, de dar al público la información completa del monumento
- vi. colocar un discreto epígrafe descriptivo en el monumento para dar a conocer que estuvo sujeto a intervenciones
- vii. exponer fotografías, planos y documentos sobre el proceso de intervención y publicar los trabajos realizados en el monumento

La localización física de un monumento es parte de su significación, y por ello el desplazamiento del todo o parte del monumento no puede ser tolerado, sino en el caso de que la conservación del mismo lo exija o bien cuando razones de un gran interés nacional o internacional lo justifiquen. La reubicación es generalmente inaceptable a menos que sea el único medio de asegurar su sobrevivencia.

#### postulado 5 - monitoreo y revisión

El programa y proceso de intervención sobre el monumento deben ser transparentes y adecuadamente registrados y monitoreados. Por un lado, las decisiones tomadas hoy pueden ser malinterpretadas en el futuro o consideradas incorrectas e inadecuadas; por otro, las obras en una construcción antigua seguramente serán analizadas críticamente durante todo su porvenir.

La bitácora vinculada a todo el proceso de conservación, restauración o rehabilitación de un monumento deberá guardarse en un archivo permanente y ser accesible al público, siempre que sea culturalmente apropiado, y bajo condiciones de seguridad y privacidad como si fuera parte de la identidad del monumento.

La fábrica que se decida remover durante la intervención, incluyendo accesorios y objetos, deberá conservarse en el sitio siempre que sea posible, además de que debe ser catalogada y protegida, de acuerdo con su significación.

Las observaciones inteligentes son un activo fundamental en la construcción, pero no siempre requieren de instrumentación, y esta última no siempre tiene que ser sofisticada. Son preferibles los instrumentos mecánicos a los eléctricos, y de estos, se prefieren los simples a los complejos. Cuando la instrumentación es complicada es imprescindible un planeamiento muy cuidadoso, así como una ejecución por técnicos experimentados que estén concientes de las dificultades en obtener resultados confiables.

En geotecnia se ha aceptado que las incertidumbres sobre la naturaleza y características del subsuelo conducen a incertidumbres sobre la pertinencia de las hipótesis y métodos de diseño.

Ante ello surge la necesidad de aplicar el Método Observacional. El objetivo fundamental del Método Observacional es proporcionar una manera de controlar el proyecto y construcción afianzando la seguridad y minimizando los costos, en la medida que el diseño puede modificar la construcción.

### **el método observacional**

Resumidamente, la aplicación completa del método se incorpora con los siguientes ingredientes (Dunnicliff y Deere, 1991):

- i. exploración suficiente para establecer al menos la naturaleza general, forma y propiedades de los depósitos de suelos, pero sin entrar necesariamente al detalle
- ii. estimación de las condiciones probables y de las desviaciones más desfavorables que se pueden concebir en esas condiciones; en esta estimación la geología tiene un papel preponderante
- iii. establecimiento del diseño basado en hipótesis de trabajo del comportamiento anticipado bajo las condiciones de trabajo más probables
- iv. selección de los aspectos que serán observados a medida que avance la construcción y cálculos anticipados de sus valores con base en las hipótesis de trabajo
- v. cálculo de esos mismos aspectos bajo las condiciones más desfavorables compatibles con los datos disponibles acerca de las condiciones del subsuelo
- vi. selección anticipada de las acciones por tomar o de la modificación del diseño para las desviaciones predecibles de las observaciones realizadas en comparación con las pronosticadas, sobre la base de las hipótesis de trabajo
- vii. medición de los aspectos que serán observados y evaluación de las condiciones reales
- viii. modificación del diseño para ajustarse a las condiciones reales

El grado en que se deben aplicar estos pasos depende de la naturaleza y complejidad del trabajo. Peck propone dos maneras de aplicar el Método Observacional:

- ix. como la mejor salida (*Best way out*): cuando se presentan en el sitio problemas inesperados durante la construcción, el Método Observacional es la única esperanza para el buen éxito de la obra
- x. *ab initio*: en los que el uso del Método Observacional se ha visualizado desde el inicio del proyecto

En los trabajos geotécnicos en monumentos históricos, por la complejidad y a veces diseño insuficiente, la aplicación del primer tipo sería la más indicada. En estos casos, la instrumentación de campo, que puede ser previamente instalada o bien ser la primera acción del consultor, es la mejor herramienta para percatarse de las incertidumbres de los resultados.

Aún con todo, el segundo tipo de aplicación no deja de tener mucha utilidad, principalmente en monumentos arquitectónicos cimentados sobre suelos con un historial complejo. De acuerdo con aquella filosofía, anteriormente a la instrumentación se deben analizar las condiciones más probables del subsuelo (como sus propiedades geometría) para deducir el comportamiento que

podrá tener la superestructura sobre la estructura térrea. Con base en estos estudios se pueden analizar las condiciones más desfavorables para identificar los riesgos posibles e incluso la falla; en este punto ya se podrá definir la instrumentación de campo que se debe instalar, así como planes de emergencia que podrían aplicarse.

concepto	definición
monumento	del latín <i>monumentum</i> , que significa "recordar", es toda obra humana de justificado valor artístico, arquitectónico, histórico, cultural o social
entorno	ambiente físico que rodea al monumento, es decir, el lugar, área, terreno, paisaje, edificio u obra, grupo de edificios u otras obras, en donde se inserta el monumento y del cual es inseparable
fábrica	materia física que constituye el monumento, que incluye materiales y técnicas de construcción, componentes, dispositivos y objetos
significación	valores que porta el monumento, como son el valor estético, histórico, científico, social o espiritual, los cuales pueden cambiar para las generaciones pasada, presente y futura, pero que siempre incluyen la fábrica, el entorno y el uso
conservación	todos los procesos llevados a cabo para cuidar a un monumento, destinados a mantener la fábrica en su estado existente, así como a defender su significación, y retardando el deterioro
restauración	Todos los procesos que ultiman la devolución al monumento de un estado anterior y conocido, removiendo agregados, o reagrupando los componentes existentes, sin el cambio de la fábrica
rehabilitación	todos los procesos que ultiman la devolución al monumento de un estado anterior y conocido, removiendo agregados y/o cambiando la fábrica
medida preventiva	medida anticipada con la finalidad de evitar un posible riesgo, amenaza o daño al monumento, alcanzando la eliminación del factor de origen
medida correctiva	medida con la finalidad de detener o mitigar un riesgo, amenaza o daño existente en el monumento, no eliminando necesariamente el factor de origen
medida temporal	medida, preventiva o correctiva, que protege el monumento durante un período de tiempo limitado y definido; adecuada cuando las causas del problema no están completamente identificadas, o como apoyo a otros trabajos de intervención
medida permanente	medida, preventiva o correctiva, que protege el monumento durante toda su vida útil, muchas veces con carácter irreversible y altamente obstructor; adecuada cuando las causas del problema son una amenaza importante para el monumento

**Tabla 5.1. Algunas definiciones para los postulados de la teoría del arte invisible.**

## 5.4. comentarios finales

Los postulados de la teoría del arte invisible son indicaciones para la práctica de aquellos que prestan asesoramiento, toman decisiones o realizan trabajos en los monumentos con significación cultural. El Método Observacional se vuelve crucial en la labor de conservación de monumentos. En el caso de la conservación del arte invisible se propone que la aplicación del Método sea obligatoria en casi todos los casos ante las incertidumbres inherentes a toda actividad geotécnica pero sobre todo ante las incertidumbres respecto a los efectos de la intervención geotécnica en el monumento que se desea conservar.

La participación de la ingeniería en la tarea de la conservación del patrimonio arquitectónico, sin duda crecerá en los años por venir, y su función es cada vez más el complemento del esfuerzo que se hace. Ingenieros de estructuras, geotécnicos, arquitectos y constructores tienen que trabajar en equipo, entenderse unos a los otros, ¡ser cada día más eclécticos!

## conclusión



“O Terramoto de Lisboa” resultó en la destrucción casi completa de aquella capital. El sismo fue seguido de un tsunami y de múltiples incendios, causando la muerte de más de 10 mil portugueses. Hoy se cree que su magnitud fue cercana a los 9 grados en la escala de Richter.

**Figura 6.1. Grabado en cobre alusivo al Terremoto de 1755 en Lisboa, Portugal.**

## 6.1. conclusiones

Los problemas geotécnicos más comunes se deben, fundamentalmente, a asentamientos y a situaciones donde se excede la capacidad de carga en los cimientos de las estructuras; estas afectaciones, a su vez, pueden tener diferente intensidad.

En ocasiones los problemas geotécnicos poseen un carácter oculto pues se desarrollan poco a poco, dado que el tiempo durante el cual actúan es más extenso que el tiempo de vida humana, y por ello, muchas veces son detectados cuando la catástrofe ya es inevitable.

También, se debe tener presente que, si bien esta lenta destrucción no sea visible, ella aumenta considerablemente la vulnerabilidad de un monumento, que delante un fenómeno momentáneo, como los sismos que sacuden la tierra, puede no sobrevivir.

Afortunadamente, hoy disponemos de un vasto abanico de procedimientos teóricos y analíticos, herramientas poderosas para entender y previsualizar los diferentes problemas que actúan sobre las construcciones monumentales.

De la misma manera, existen muchas soluciones geotécnicas para prevenir o corregir las distintas afectaciones en los edificios. Algunas de esas soluciones todavía están bajo estudio, otras ya son dominadas por los geotécnicos, pero lo importante es que su aplicación se inserte cada vez más en las recomendaciones de las Cartas Internacionales de Restauración de Monumentos.

Para lograr el objetivo fundamental de preservar el monumento, se puede optar por una intervención más o menos obstructora, lo que dependerá de la gravedad del problema y de la naturaleza y tipo estructural del monumento. Las soluciones no obstructoras son las más deseables pues no impiden el uso del inmueble ni destruyen el patrimonio enterrado. Pero, dado que la superestructura es el arte visible, muchas veces se sacrifica la autenticidad del apoyo invisible de la obra monumental.

Los varios casos historia descritos en este trabajo, dispersos por el mundo y ubicados en distintos ambientes, son valiosas enseñanzas para otras intervenciones en monumentos históricos. La ingeniería geotécnica, así como muchas otras disciplinas, ha evolucionado en buena medida con base en el ensayo y error; por ello la experiencia pasada es tan importante en el aprendizaje y mejoramiento de las técnicas artesanales.

Muchos ejemplos de restauración podrían ser considerados como un *ex nihilo*, sin embargo son más bien la adaptación inteligente de lo que crearon nuestros antepasados. Dentro de la misma línea, el conocimiento presente, los monumentos que restauramos, y las técnicas en boga actualmente, serán material didáctico para las futuras generaciones.

La práctica de restauración de monumentos es altamente interdisciplinaria, por lo que la interacción entre ingenieros geotécnicos, estructuristas, arquitectos, arqueólogos, etc., es de suma importancia para solucionar adecuadamente los problemas que afectan al patrimonio construido.

Muchos expertos ya poseen recomendaciones por las que rigen su práctica profesional, pero no los ingenieros geotécnicos. Asimismo, se propuso en este trabajo una teoría del arte invisible, basada en particularidades fundamentales y solamente aplicables a la geotecnia, así como en los principios de las Cartas Internacionales.

El buen diagnóstico de un monumento siempre incluirá un análisis detallado de las condiciones geológicas y geotécnicas locales. La historia y trayectoria de esfuerzos del subsuelo en donde se apoya la obra es fundamental tanto para la comprensión del problema que lo afecta, como para la solución a emplear.

Uno de los instrumentos más importantes es la observación. Con ella se puede detectar mucha de la información sobre una obra apoyada en una masa de suelo. Sin embargo, existen casos en los cuales también es necesario recurrir a instrumentos especializados, junto con la observación dan la imagen suficiente para llegar a conclusiones útiles.

La intervención y práctica sobre el monumento debe tener presente la preservación del carácter, historia, trabajo humano y enigmas de las obras construidas. Asimismo, se debe luchar por la estabilización permanente e invisible de las construcciones monumentales.

La aplicación del Método Observacional es fundamental e indispensable para procesar e interpretar oportunamente todos los datos geotécnicos a fin de monitorear el comportamiento de la estructura monumental.

## 6.2. recomendaciones

Todos los participantes en un dado proyecto de restauración deben actuar de forma conservadora, es decir, su obligación primordial es la protección de la vida y propiedad de las culturas, por lo que no se puede comprometer la seguridad de las construcciones en ningún momento. A pesar de esto, tampoco se pueden dejar llevar por el conservadurismo exagerado, ya que este encamina muchas veces a una solución menos satisfactoria que la lograda en caso de aceptación de determinados riesgos razonables.

En lo que concierne a la práctica geotécnica, se debe colocar más atención en el cálculo corroborado de las propiedades reales de los suelos y rocas que dan asiento a las construcciones monumentales, particularmente en lo que se relaciona con compresibilidad y resistencia al cortante, a la vez de confiar implícitamente en los resultados de pruebas, especialmente en los casos en que el subsuelo es errático. Por ello, la importancia del examen de todos los aspectos de la historia y ocurrencia de depósitos, de tal forma que se logre una estimación más aproximada a la realidad.

Debe tenerse presente que, a pesar de las incertidumbres sobre el comportamiento de lo construido, de las condiciones del subsuelo, etc., un ingeniero restaurador nunca debe ser tomado por sorpresa. En una intervención sobre un edificio con importancia histórica, es importante prever soluciones alternativas, así como las consecuencias de inferencias equivocadas en cuanto al estado de la superestructura, y en relación a las condiciones del subsuelo.

Como la tierra ha grabado sus peripecias más relevantes, los geotécnicos, y todos los integrantes de un proyecto de restauración, deben escribir con más discriminación, y principalmente, documentar sus intervenciones para que las generaciones venideras puedan inferir por tantos libros (los nuestros y los de la madre tierra), lo sucedido a lo largo del tiempo.

### 6.3. reflexiones finales

La conservación de monumentos históricos no solo es una labor romántica, sino también objetiva para la salvaguarda de un recurso económico no renovable. Cualquier edificio construido tiene por objeto beneficiar la calidad de vida y mejorar el ambiente del barrio, ciudad o región en donde se sitúa. A su vez, el conjunto de aquellos edificios antiguos, conjuntamente con las calles, forman los centros históricos, es decir, espacios de incalculable valor porque atestiguan los sucesos de una nación.

Por ese carácter inmortal que adquiere a lo largo del tiempo todo el trabajo del Hombre, ha sido necesario apoyar y cimentar debidamente las estructuras. Prueba de ello son los primeros palafitos colocados en las riberas lacustres por el Hombre primitivo, solución que resultó en los estacones de madera, y más tarde en las inclusiones rígidas, actualmente muy usadas en suelos blandos para mejorarlos. De igual manera, en las culturas orientales fácilmente se encuentra el bambú usado como un pilote ligero empleado para la cimentación de viviendas, vialidades, etc.; este material, si no sufre ciclos de humedecimiento y secado, posee una prolongada vida útil.

La práctica de restauración exitosa requiere de un elevado grado de juicio. Hubo tiempos en los que el juicio era empírico; los constructores de las catedrales góticas eran ignorantes en relación al análisis de esfuerzos como lo vemos y estudiamos hoy. Sin embargo, existen muchas evidencias de que ellos basaban sus cálculos en el comportamiento de modelos a la escala, es decir en el juicio de la observación, lo que condujo a construcciones gloriosas.

La tierra y sus mitos han sido exhaustivamente relatados y representados en todas las Bellas Artes. Los que se dedican a la restauración de monumentos, miran el planeta Tierra como un almacén de memorias y custodia de las magnas impresiones del Hombre. El espacio terrestre es como un libro que cuenta las lecciones de nuestro pasado, a pesar de que algunas de sus páginas han perdido letras, palabras y frases. Por lo demás, la escritura aún visible en el suelo muchas veces no cuenta todo, sino que esconde algo misterioso de la arquitectura que inspiró a la humanidad.

La profesión de los restauradores tiene un futuro desafiante. En particular los ingenieros geotécnicos tienen una labor gobernada por las leyes de la Mecánica y de la Hidráulica, además de que todas las estructuras son construidas dentro o sobre un medio geológico. Es por la Geología y por la variabilidad de la naturaleza en general, ya sean los fenómenos naturales o los incitados por el Hombre, que nunca existieron ni existirán problemas similares, haciendo de la labor del geotécnico una de las más complejas dentro de la restauración de monumentos.

# anexos

## 7.1. reseña de las principales teorías de restauración

El interés por la restauración de monumentos se acentúa en el siglo XIX con la aparición de personas dedicadas a conservar, recuperar y, en algunos casos, reconstruir la memoria pasada. Viollet-le-Duc fue el caso más notorio y se le puede considerar como el primer restaurador; después de haber estudiado extensivamente la arquitectura gótica, se dispuso a reconstruir y completar las obras “inconclusas” del decimonono. Fue uno de los primeros expertos en escribir sus ideas y métodos, lo cual permitió las críticas de John Ruskin, y sus seguidores, fundamentadas en el romanticismo inglés.

En el siglo XX comienza una fuerte corriente para afirmar las prácticas de rescate de los bienes pretéritos. Empieza en Italia con las obras de Camilo Boito. Concomitantemente, en Austria, Alöis Riegl escribe sobre los valores de los monumentos, punto de vista interesante y de gran valor para las teorías subsiguientes. Con la asunción del régimen fascista (1918-1939), se da una intensa labor de restauración y reconstrucción del pasado romano y renacentista del país, estableciendo las condiciones para la creación del *Istituto Centrale per il Restauro*. En esta institución surgirá un gran teórico de la restauración, Cesare Brandi.

### 7.1.2. la forma prístina

Las primeras teorías sobre la restauración que nacieron en Europa fueron influenciadas por el arquitecto, arqueólogo y escritor francés Eugène Emmanuel Viollet-le-Duc (1814-1879) (Fig. 7.1), que se dedicó principalmente a la restauración de monumentos góticos. Los desastres de la Revolución Francesa (1789-1799) dejaron a los monumentos de su patria en estado precario, por lo que en el siglo XIX se pretendía recuperar el esplendor de las catedrales, castillos, iglesias y, en general, de todos los edificios medievales. Así, nace con Viollet-le-Duc la “restauración del estilo”, rehacer el monumento tal cual como fue, o en sus palabras, “*restituirlo a un estado completo que quizá, no haya existido nunca*” (Macarrón Miguel, 1995).



*“El estilo es a la obra de arte, lo que la sangre es al cuerpo humano”, en Diccionario Razonado de la Arquitectura Francesa (1868).*

**Figura 7.1. Retrato de Viollet-le-Duc.**

Obstinado con el gótico, estilo oficial francés, y con base en su visión de la restauración, desviste a los edificios de añadidos de otros estilos, con el fin de recuperar su forma ideal, aunque nunca hubieran sido así. En suma, lucha por obtener la forma prístina, destruida por la Revolución, así como la “re-prístina”, destruyendo lo que el tiempo escribió.

Debido a su conducta, Viollet-le-Duc fue acusado de haber creado los llamados “falsos históricos”, contradictorios de una gran lucha en la restauración: la búsqueda de la “la autenticidad del monumento”.

### 7.1.2. lo autentico

El crítico de arte inglés John Ruskin (1819-1900) (Fig. 7.2) fue contemporáneo de Viollet-le-Duc pero se posicionaba en el extremo opuesto a las teorías de aquél. Ruskin representa la conciencia romántica, moralista y literaria, en contraposición a la “restauración del estilo” y defendiendo “la autenticidad histórica” (Hernández Martínez, 1999).



*“La arquitectura es un arte para que todos los hombres aprendan, porque todos están preocupados con ella; y ella es tan simple que no hay excusa para no ser conocida...”*,  
en *Lecturas Sobre Arquitectura y Pintura*  
(1853).

**Figura 7.2. Ruskin como Profesor de Arte en Oxford.**

Para este inglés, la tríada vivencial de un edificio es como la del ser humano: nacer, vivir y morir. Así, restaurar un monumento es destruirlo, es crear falsas copias e imitaciones, admitiendo como única operación la conservación que retrasa la ruina. Es famosa y elocuente esta declaración plasmada en su célebre libro “Las Siete Lámparas de la Arquitectura”:

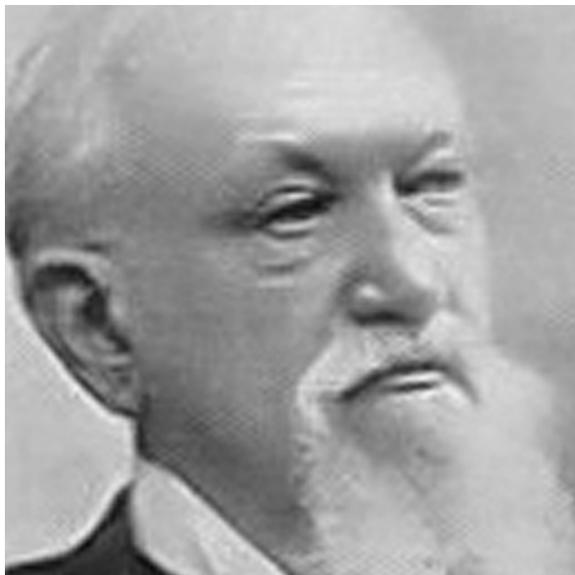
*“Velad con vigilancia sobre un viejo edificio; guardadle como mejor podáis y por todos los medios de todo motivo de descalabro. No os preocupéis de la fealdad del recurso de que os valgáis; más vale una muleta que la pérdida de un miembro. Y haced todo esto con ternura, con respeto y una vigilancia incesante y todavía más de una generación nacerá y desaparecerá a la sombra de sus muros. Su última hora sonará finalmente pero que suene abierta y francamente y que ninguna intervención deshonrosa y falsa venga a privarla de los honores del recuerdo”.*

John Ruskin, en *Seven Lamps of Architecture*, 1849

En esta cita se plasma el romanticismo caracterizador del siglo XIX inglés. La conservación del monumento se sobrepone a la restauración, el cuidado atento se superpone al parche remediador. También se denota la ardiente moralidad con el fin de sensibilizar al ser humano hacia lo auténtico. Por lo demás, opina que la restauración arquitectónica *“es imposible, tan imposible como resucitar a los muertos, restaurar algo que haya sido grande o bello en la arquitectura”.*

### 7.1.3. la restauración científica

El italiano Camilo Boito (1836-1914) (Fig. 7.3), arquitecto, ingeniero e historiador del arte, es considerado como el padre de la restauración científica o de la restauración moderna. Fue inspirador, junto a Gustavo Giovannoni, de la famosa Carta de Atenas, documento internacional que ha servido de punto de partida de los nuevos conceptos sobre la restauración (Capitel, 1999).



Según Boito, el primer y romántico paso en la práctica profesional es: “conservar, no restaurar”.

**Figura 7.3. Camilo Boito.**

Boito se basa en las ideas románticas y moralistas de Ruskin pero sin admitir su visión fatalista del fin del monumento, concibiendo éste como obra arquitectónica e histórica a la vez. Propone, entre otros, la coexistencia de los diferentes estilos que se hallen en el monumento, sin buscar nunca la unidad de estilo, así como diferenciar claramente lo antiguo y el añadido moderno, eliminando los falsos históricos, dejando constancia documental y dando publicidad a lo restaurado o añadido. Como Ruskin, Camilo Boito defiende la conservación, antagónicamente a la idea de reconstrucción propuesta por Viollet-le-Duc.

### 7.1.4. el valor del monumento

La historia de la restauración no puede ser escrita sin subrayar la gran importancia de los ensayos del austriaco Alois Riegl (1858-1905) (Fig. 7.4), realizados entre 1903 y 1905, sobre todo el texto central: “El Moderno Culto a los Monumentos, Sus Características y Sus Inicios” del 1903. Según Riegl, el “monumento intencional” es aquel que tiene la función de recordar un evento o un

personaje del pasado; tiene la función de conmemorar. A su vez, los “monumentos históricos y artísticos” son aquellos que testimonian la cultura del pasado en sentido general.



Autor del *Moderno Culto a los Monumentos*, en donde subraya la importancia de los Valores que poseen las construcciones monumentales antepasadas.

**Figura 7.4. Alöis Riegl.**

Por lo demás le asigna valores a los monumentos. El “valor histórico” lo tiene cualquier evento trascendente, sin importar su grandeza, basta que ponga al observador en contacto con la cultura del pasado. Por otra parte, el “valor artístico” se relaciona con el concepto de “voluntad de arte” y por eso no existe ningún momento de la producción de la manifestación artística del pasado que prevalezca sobre otras. A su vez Riegl propone el “valor de lo antiguo” casi de manera profética: *“es el máximo grado de conocimiento que el hombre puede poseer de frente a la cultura del pasado”* (Riegl, 1987).

Estos valores están divididos en dos importantes grupos; uno es el “valor como memoria”, que relaciona al pasado a través de los valores artísticos, históricos y valores de lo antiguo; otro grupo es el de los valores “contemporáneos” y estos son el “valor de uso”, “valor de novedad” y “valor artístico relativo” positivo o negativo.

Sin embargo, Riegl no percibió de inmediato que los dos grupos mencionados se pueden contradecir. En efecto, el concepto de “valor de uso” entra en conflicto con el “valor histórico” o con el “valor de lo antiguo”. El “valor de uso” propone una serie de modificaciones y adaptaciones que conducen al monumento hacia una nueva posibilidad funcional, dejando lo histórico o antiguo sin valor. Para solucionar dicho conflicto el autor propuso dos casos diferentes: el primer caso en el cual *el edificio pierde toda la posibilidad de utilización*, y por lo tanto, no existe materia de discusión entre los diversos valores y el monumento puede ser totalmente conservado; el

segundo caso es el de *los edificios que han conservado totalmente la función original*, en donde, el conflicto no existe porque se pueden limitar las intervenciones necesarias para el “valor de uso”, y que son consistentes con el mantenimiento del “valor histórico” y del “valor de lo antiguo” (Riegl, 1987).

### 7.1.5. la restauración crítica

Después de la Segunda Guerra Mundial (1939-1945) muchos de los centros históricos del viejo continente quedaron hechos cenizas, de tal forma que la idea del monumento como testigo documental no se podía aplicar de forma generalizada. Asimismo, el italiano Benedetto Croce plantea una teoría de restauración basada en la expresión íntima y emotiva del restaurador, en un proceso crítico de auto-análisis y de toma de decisiones del restaurador frente al monumento a la que llamó “restauración crítica”.



“Es la obra la que condiciona la restauración y no al revés”, en *Teoría del Restauo* (1963).

**Figura 7.5. Cesare Brandi.**

El principal mentor de Croce fue el italiano Cesare Brandi (1906-1988) (Fig. 7.5). Para este historiador y crítico de arte, la restauración gira alrededor del reconocimiento de la obra de arte. Esta posee un doble carácter, como realidad estética e histórica a las que Brandi llama “instancias”, que constituyen medios de acceso a la realidad y al conocimiento que la obra contiene (Brandi, 1999). Por otro lado, establece que la obra de arte goza de una unidad potencial que le da identidad a pesar del tiempo y de las transformaciones. Con estas ideas, da la siguiente definición:

*“La restauración constituye el momento metodológico del reconocimiento de la obra de arte, en su consistencia física y en su doble polaridad estética e histórica, en orden a su transmisión al futuro.”*

Cesare Brandi, en Teoría de la Restauración, 1999

Por lo demás, el autor admite que dicha consistencia física, es decir, lo material de la obra de arte, es susceptible de ser restaurado, aunque la materia y la imagen sean consustanciales (Brandi, 1999). Finalmente, esta idea es muy realista ya que los medios físicos funcionan como soporte para los estéticos e históricos, o en otros términos, los cimientos de un edificio arquitectónico y la tabla o tela de una pintura son esenciales para la subsistencia de la imagen artística. Así, sugiere que:

*“La restauración debe dirigirse al reestablecimiento de la unidad potencial de la obra de arte, siempre que esto sea posible sin cometer una falsificación artística o una falsificación histórica, y sin borrar huella alguna del transcurso de la obra de arte a través del tiempo.”*

Cesare Brandi, en Teoría de la Restauración, 1999

## 7.2. reflexión sobre las teorías de restauración y la geotecnia

Para Viollet-le-Duc era más importante lo didáctico de la arquitectura antepasada que la fidelidad histórica del monumento. Reconstruía lo que ya estaba en ruinas para enseñar “más claramente” la historia. De la misma manera, en ingeniería se permite y pretende proporcionar al edificio una estabilidad que, a lo mejor nunca existió, con la finalidad de prolongar su vida, o más aún, de otorgarle un nuevo ciclo existencial. Por eso, muchos críticos opinan que la restauración de un monumento, según Viollet-le-Duc, no era parte o el final del ciclo de vida del monumento, sino que el inicio, o el reinicio.

A pesar de todo lo que aportó a la disciplina de restauración de monumentos, su afán de reconocimiento lo condujo a muchos atentados contra la ética profesional, como es el caso de Notre Dame (Fig. 7.6), desacierto que cualquier especialista nunca debe cometer. La restauración de la mencionada catedral se empezó por Lassus y Viollet-le-Duc en 1846; después de la muerte del primero, Viollet toma el mando. Este realiza muchas modificaciones: inserción de gabletes en las ventanas, invento del rosetón sur, cambio de la piedra de los arbotantes por piedra nueva, reconstrucción de todas las capillas interiores y altares, colocación de estatuas nuevas en la Galería de los Reyes, y como faltaban algunas cabezas, fueron copiadas de catedrales cercanas. Además de todo esto, Viollet planeó un aislamiento de la Catedral, arrasando con todos los edificios de los alrededores.



Viollet-le-Duc, durante la restauración de la catedral parisiense, colocó una estatua suya en los techos, y su rostro en otras que lo carecían.

**Figura 7.6. Quimeras en la fachada de la catedral de Notre Dame, Paris, Francia.**

Por el contrario, según Ruskin, la restauración de un monumento histórico imponente, como una catedral, desde sus retablos a su cimentación, sería inaceptable. Sin embargo, en presencia de la eventual ruina de un edificio como la Basílica de San Marcos (Fig. 2.2), el crítico inglés llega a proponer la recomposición de los fragmentos de mármol y la re-estructuración con elementos de refuerzo.

Su posición es comprensible: aun queriendo dejar morir dignamente a un monumento, su noble conciencia de amante del arte no quiere asistir a la ruina, de esa obra arquitectónica inusitada, impávida y serenamente. Por eso, el romántico fatalista finalmente asiente a la recuperación de la historia, aunque la mayoría de sus escritos dicen lo contrario. De esta forma, Ruskin seguramente admitiría la conservación en el ámbito de la ingeniería geotécnica, por ser un arte invisible, y que no atropella a la ideología romántica del siglo XIX.

Entre estas dos posiciones radicalmente opuestas, los escritos de Alöis Riegl asumen doble significado. Riegl no decreta posiciones rígidas contra la restauración, aunque condena las intervenciones que alteran en todos los sentidos a los monumentos, con base en el “valor de memoria”. Aceptando lo anterior, por ejemplo, la mitad de la Catedral Metropolitana de la ciudad de México (Fig. 2.14) estaría ya bajo suelo, por los asentamientos y consecuentes daños estructurales. No obstante, como ya se dijo, Riegl entra en conflicto con los valores del objeto de arte, el histórico o de lo antiguo con el de uso; por lo tanto, si nos posicionamos en el segundo caso, en donde el edificio no pierde su función como es el caso de las grandes obras religiosas, los trabajos de ingeniería en la conservación de monumentos son loables, pues mantienen prendida la llama de la “memoria”.

Camilo Boito, por su destreza y conocimientos de ingeniería, logra conjuntar varios campos de la restauración. La restauración científica es, indubitablemente, muy adecuada a la ingeniería. Es

cierto que no dejamos a la vista la evidencia de la restauración, o trabajo de conservación, plasmados en el edificio; empero, la constancia documental de los hechos es imprescindible para un buen uso del edificio, además de que sirve de apoyo a trabajos futuros. De la misma manera, la investigación histórica del funcionamiento estructural, o del subsuelo que apoya a un monumento, es cardinal en las correctas restauraciones. Por último, Boito acredita que es preferible conservar o restaurar antes de reconstruir una obra monumental, filosofía que el ingeniero restaurador debe tener siempre en mente.

Finalmente, Cesare Brandi es el primero que habla de las cimentaciones en los edificios como apoyos de la obra de arte que los ojos del mundo aprecian. No queriendo quitar valor a estos apoyos, pues sin ellos no existiría la obra, admite que aquellos son más susceptibles de someterse a intervenciones de restauración por su carácter invisible. Asimismo, en el caso de que las condiciones de la obra de arte exijan el sacrificio de una parte de la consistencia material, tal sacrificio, o en general la intervención deberá ser llevada a cabo. Así, también en la ingeniería se debe considerar que la singularidad de la obra de arte se superpone a los otros productos humanos integrados en el monumento, o sea la consistencia material. Si el ingeniero no se detiene en recuperar, sin falsificar, el dúo arte-historia, no quedará más que una reliquia.

# fuentes

## 8.1. bibliografía

### a

**Artigas, J. B.** "Arquitectura Colonial Iberoamericana, La Arquitectura Virreinal Mexicana". Caracas: Armitano Editores C. A., 1997.

**Artigas, J. B.** "Arquitectura a Cielo Abierto en Iberoamérica como un Invariante Continental – México, Guatemala, Colombia, Bolivia, Brasil y Filipinas". México: Edición de Autor, 2003.

**Artigas, J. B.** "Juegos de Barroco desde México". México: Universidad Nacional Autónoma de México, s/f.

**Aubry, J. y Dhouib, A.** "Congélation des Sables de Cuise du Bassin Parisien". En: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place*. Paris: 2004. p. 349-362.

**Auvinet, G.** "Reflexiones sobre un estudio de mecánica de suelos realizado en 1904". En: *Revista de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (SMMS)*. México: SMMS, Nov-Dic 2004. p. 15-21.

**Auvinet, G. y Rodríguez, J. F.** "Rigid Inclusions in Mexico City soft soils: History and perspectives". En: *Simposio - Inclusiones Rígidas en Suelos Difíciles*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C., 2006, p. 29-35.

**Azevedo, J. y Sincaian, G.** "Modelling the seismic behaviour of monumental masonry structures". En: ICOMOS, in partnership with the Bethlehem 2000 Project Authority. *International Millennium Congress, Selected Papers Volume II, Session 5*. Bethlehem: UNESCO, 2001. p. s/n.

### b

**Baldini, U.** "Teoría de la Restauración y Unidad Metodológica", Volumen Primero. Florencia: Nerea-Nardini Editore, 1997.

**Besson, C.** "Congélation des Sols pour une Liaison entre Deux Tubes du Boulevard Périphérique Nord de Lyon (France)". En: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place*. Paris: 2004. p. 387-394.

**Brandi, C.** "Teoría de la Restauración", cuarta reimpresión. Madrid: Alianza Editorial S.A., 1999.

**Bonet i Armengol, J. et al.** "Dictamen sobre el paso del Túnel del AVE por la calle Mallorca, junto al Templo Expiatorio de la Sagrada Familia". Barcelona: Dirección facultativa de las obras del Templo Expiatorio de la Sagrada Familia, 2006.

**Burghignoli, A.; Jamiolkowski, M. y Viggiani, C.** "Geotechnics for the Preservation of historic cities and monuments: component of a multidisciplinary approach". En: *XIV ECSMGE*. Madrid: 2007. p. 1-36.

**Burland, J. B.; Jamiolkowski, M. y Viggiani, C.** "The stabilization of the Leaning Tower of Pisa". En: *Workshop Passado, Presente e Futuro dos Edifícios da Orla Marítima de Santos*. Santos: 2003. p. 59-76.

**Burland, J.** "A Tale of Two Towers: Big Ben and Pisa". The Royal Academy of Engineering and the Royal Society of Edinburgh. London: The Royal Academy of Engineering, 2002.

**Butterfield, R.** "On subsidence and eustacy in relation to Venice". En: *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference, Vol. 2*. London: Thomas Telford, 2004. p. 1231-1242.

## C

**Capitel, A.** "Metamorfosis de Monumentos y Teorías de la Restauración", segunda reimpresión. Madrid: Alianza Editorial S.A., 1999.

**CIAM IV (IV Congreso Internacional de Arquitectura Moderna).** "Carta de Atenas, 1931". En: Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). *Publicaciones Exconvento de Churubusco*. México: INAH, 1978. p. s/n.

**Cóias e Silva, V.** "Preserving "Baixa Pombalina" through low intrusive seismic rehabilitation methods. The COMrehab project". En: ICOMOS, in partnership with the Bethlehem 2000 Project Authority. *International Millennium Congress, Selected Papers Volume II, Session 5*. Bethlehem: UNESCO, 2001. p. s/n

**Colleselli, F. y Cortellazzo, G.** "Behavior of a building in Venice during and after underpinning". En: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering; Associazione Geotecnica Italiana y Università degli Studi di Napoli Federico II. *Geotechnical Engineering for the Preservation of Historical Sites: Arrigo Croce Memorial Symposium, Pre-Prints Volume*. Napoli: 1996. p.104-111.

**Colombo, P. y Colleselli, F.** "Preservation problems in historical and artistic monuments of Venice". En: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering; Associazione Geotecnica Italiana y Università degli Studi di Napoli Federico II. *Geotechnical Engineering for the Preservation of Historical Sites: Arrigo Croce Memorial Symposium, Pre-Prints Volume*. Napoli: 1996. p. 112-121.

**Consiglio Superiore Delle Antichità de Belle Arté (CSABA).** "Carta del Restauro, 1932". En: Perrogalli, Carlo. *Monumenti e metodi di valorizzazione. Saggi, storia e caratteri delle teoriche sul restauro in Italia, dal Medioevo ad oggi*. Traducción libre de Alfredo Hernández Angeles. Milano: Librería editriche Politecnica Tamburini, 1954. p. 77-80.

**Corko, D. et al.** "Application of Jet Grouting in Slide Remediation". En: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place*. Paris: 2004. p. 109-113.

**Cortés Rocha, X. et al.** "Restauración de la Catedral de México". Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial (FONCA), Consejo Nacional para la Cultura y las Artes (CONACULTA), Dirección General de Sitios y Monumentos del Patrimonio Cultural (DGSMPC). México: UNAM, CONACULTA, 2006.

d

**Del Moral, E.** "Defensa y Conservación de las Ciudades y Conjuntos Urbanos Monumentales". México: Academia de Artes, 1977.

**Dunnicliff, J. y Deere, D. U.** "Judgment in Geotechnical Engineering – The Professional Legacy of Ralph B. Peck". Vancouver: BiTech Publishers Ltd, 1991.

g

**Gajo, A.; Soranzo, M. y Vitaliani, R.** "Subsoil characteristics and foundation settlement analysis of St. Mark's basilica in Venice". En: International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering; Associazione Geotecnica Italiana y Università degli Studi di Napoli Federico II. *Geotechnical Engineering for the Preservation of Historical Sites: Arrigo Croce Memorial Symposium, Pre-Prints Volume*. Napoli: 1996. p. 245-256.

**García-García, A.** "Levantar la Torre de Pisa". En: *Restauración y Rehabilitación, Revista Internacional del Patrimonio Histórico*. Madrid: América Ibérica, Noviembre de 2000, No 46. p. 26-31.

**Gottardi, G. y Tonni, L.** "The Treporti test site: Exploring the behaviour of the silty soils of the Venetian lagoon". En: *The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Osaka: 2005. p. 1037-1040.

**Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti.** "The Catania Project – Earthquake damage scenarios for a high risk area in the Mediterranean". Roma: E. Faccioli and V. Pessima, 1999.

**Guzmán, J. C. y Zúñiga, L. M.** "Palacio de Bellas Artes – Campañas de Inyección del Subsuelo: 1910, 1912 y 1913; 1921; 1924 a 1925". México: TGC, Geotecnia S. A., 1998.

h

**Hernández Martínez, A.** "Documentos para la Historia de la Restauración". Zaragoza: Universidad de Zaragoza, Departamento de Historia del Arte, 1999.

**Heyman, J.** "The Stone Skeleton – Structural Engineering of Masonry Architecture". Cambridge: University Press of Cambridge, 1995.

i

**International Council on Monuments and Sites (ICOMOS).** "Charte de Florence, 1982". En: Dinkel, René. *Encyclopédie du Patrimoine*. Traducción libre de Hernández Angeles. París: Les Encyclopédies du Patrimoine, 1997. p: 530-532.

**International Council on Monuments and Sites (ICOMOS).** "Charte Internationale pour la sauvegarde des villes historiques, 1987". En: Dinkel, René. *Encyclopédie du Patrimoine*. Versión confrontada con la traducción del ICOMOS México. París: Les Encyclopédies du Patrimoine, 1997. p: 538-539.

**International Council on Monuments and Sites (ICOMOS).** “Documento de Nara, Japón 1994, sobre la autenticidad en relación con la convención del patrimonio mundial”. En: UNESCO: <http://whc.unesco.org/archive/nara94.htm>. Traducción libre de Alfredo Hernández Angeles confrontada con la traducción de ICOMOS.

**International Council on Monuments and Sites (ICOMOS).** “Carta de Burra, Carta del ICOMOS Australia para Sitios de Significación Cultural, 1999”. En: <http://www.icomos.org/australia/charter.html>.

**Iwasaki, Y.** “Restoration of foundation of northern library of Bayon temple, Angkor. Camboya”. En: *The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Osaka: 2005. p. 2755-2758.

j

**Jamiolkowski, M. et al.** “The Restoration of the Leaning Tower: Present Situation and Perspectives”. *Workshop on the Tower of Pisa, Vol 1*. International Comité for the Safeguard of the Tower of Pisa. Pisa, Italy: Pre-prints of the Reports, 1999.

**Johnston, G. y Burland, J.** “An Early Example of the Use of Underexcavation to Stabilize the Tower of St. Chad, Wybunbury in 1832”. En: ICOMOS, in partnership with the Bethlehem 2000 Project Authority. *International Millennium Congress, Selected Papers Volume II, Session 4*. Bethlehem: UNESCO, 2001. p. s/n.

**Juárez Badillo y Rico Rodríguez.** “Mecánica de Suelos, Tomo 1 – Fundamentos de la Mecánica de Suelos”. Ciudad de México: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 2003.

**Juárez Badillo y Rico Rodríguez.** “Mecánica de Suelos, Tomo 2 – Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de Suelos”. Ciudad de México: Editorial Limusa, S.A. de C.V., 2000.

k

**Kerisel, J.** “Down to Earth – Foundations Past and Present: The Invisible Art of the Builder”. Rotterdam: A.A.Balkema, 1987.

l

**Lionello, A. y Cavaggioni, I. et al.** “Preliminary investigation and monitoring for the design of a strengthening intervention on the Frari basilica, Venice”. En: *Structural Analysis of Historical Constructions*. Modena, Lourenço & Roca. London: Taylor & Francis Group, 2005. p. 1323-1333.

**Lobo Quintero, W.** "Evaluación y Rehabilitación sismorresistente de Monumentos Históricos". En: *Revista Geográfica Venezolana*. Caracas: 2003, Vol. 44, No. 2, p. 303-318.

**Lourenço, P. B.** “Reabilitação de construções antigas – Casos práticos”. Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil. Guimarães: s/f. p. s/n.

**Luna González, O. J. y Auvinet Guichard, G.** “Principios para una Normatividad en Inclusiones”. En: *Simposio - Inclusiones Rígidas en Suelos Difíciles*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A.C., 2006, p. 131-138.

m

**Macarrón Miguel, A. M.** "Historia de la Conservación y la Restauración - desde la antigüedad hasta finales del siglo XIX". Madrid: Editorial Tecnos S.A., 1995.

**Mair, R. J.** "Research on Tunneling - Induced Ground Movements and their effects on buildings - lessons from the Jubilee Line extension". En: *Response of buildings to excavation-induced ground movements*. Proceedings of the International Conference held at Imperial College. London: F. M. Jardine, 2003. Keynote Lecture.

**Martínez Justicia, M. J.** "Antología de Textos sobre Restauración - selección, traducción y estudio crítico". Jaén: Universidad de Jaén - Servicio de Publicaciones, 1996.

**Marsal, R. J. y Mazari, M.** "El Subsuelo de la Ciudad de México". Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 1969.

**Matos Fernandes, M.** "Mecânica dos Solos – I Volume". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1994.

**Matos Fernandes, M.** "Mecânica dos Solos – II Volume". Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 1995.

**Matos Fernandes, M.** "Mecânica dos Solos, Conceitos e Princípios Fundamentais", Volume I. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2006.

**Meli, R.** "Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos". México: Fundación ICA. A.C., 1998.

**Merz, T. y Khorchi, M.** "Speed-Soilmixing – A New Method for Ground Improvement". En: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. *Symposium International sur l'Amélioration des Sols en Place*. Paris: 2004. p. 225-228.

**Moreno Pecero, G.** "Refoundation Research of Mexico's National Palace". En: X ICSMFE, Proceedings of the Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Volume 3. Rotterdam: A. A. Balkema, 1981. p. 133-137.

o

**Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).** "Carta internacional sobre la conservación y la restauración de los monumentos y de los sitios, 1964". En: Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). *Publicaciones Exconvento de Churubusco*. México: INAH, 1978. p. s/n.

**Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).** " Recomendación sobre la protección, en el ámbito nacional, del patrimonio cultural y natural aprobada por la Conferencia General en su decimoséptima reunión, París, 16 de noviembre de 1972". En: Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). *Publicaciones Exconvento de Churubusco*. México: INAH, 1978. p. s/n.

**Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).** " Recomendación relativa a la salvaguardia de los conjuntos históricos y su función en la vida

contemporánea, Sesión XIX Nairobi, 1976". En: Diaz Berrio Fernández, Salvador. *Protección del patrimonio cultural urbano*. México: Colección Fuentes INAH, 1986. p. 137-147.

**Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).**

"Charte du tourisme culturel, 1976". En: Dinkel, René. *Encyclopédie du Patrimoine*. Traducción libre de Hernández Angeles. París: Les Encyclopédies du Patrimoine, 1997. p: 533-535.

**Ovando, E. y Santoyo, E.** "Paralelismo entre la Torre de Pisa y la Catedral de la Ciudad de México". En: *Ingeniería Civil*. México: Órgano oficial del Colegio de Ingenieros Civiles de México, Mayo 2003 (Año LIII), No 409. p. 22, 23, 30-34, 36-38.

**Ovando-Shelley, E. et al.** "Estimation of seismic hazard to rehabilitate the Temple of La Compañía in Puebla, México". En: ICOMOS, in partnership with the Bethlehem 2000 Project Authority. *International Millennium Congress, Selected Papers Volume II, Session 4*. Bethlehem: UNESCO, 2001. p. s/n.

**Ovando-Shelley, E. et al.** "Effects on soil properties of future settlements in downtown Mexico City due to ground water extraction". En: *Geofísica Internacional*. Nueva York: 2003, Vol. 42, No 2. p. 185-204.

**Ovando-Shelley, E. et al.** "Extracción de agua y Hundimiento Regional: Sus Efectos en la Respuesta Sísmica de las Arcillas de la Ciudad de México". En: *Coloquio Conmemorativo: La Ingeniería Geotécnica a 20 Años de "El Sismo"*. México: Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, 2005. p. 35-48.

**Ovando Shelley, E. et al.** "Mexico City: Geotechnical Concerns in the Preservation of Monuments". En: *International Journal of Architectural Heritage*, 2. London: Taylor and Francis Group, LLC, 2008. p. 1-23.

**Ovando Shelley, E.; Pinto de Oliveira, M. y Santoyo, E.** "Regional Subsidence and Earthquakes as Threats to Architectural Monuments in Mexico City". En: *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Paper No. W2-1005*. Thessaloniki: Kyriazis Pitilakis, 2007. p. 410-426.

**Ovando-Shelley, E.; Ossa, A. y Romo, M. P.** "The sinking of Mexico City: Its effects on soil properties and seismic response". En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Amsterdam: Elsevier Ltd., 2007, No 27. p. 333-343.

**Ovando-Shelley, O. y Santoyo, E.** "Salvaging the Capilla de las Ánimas in Mexico City". En: ICOMOS, in partnership with the Bethlehem 2000 Project Authority. *International Millennium Congress, Selected Papers Volume II, Session 4*. Bethlehem: UNESCO, 2001. p. s/n.

p

**Prado-Núñez, R.** "Procedimientos de Restauración y Materiales, Protección y Conservación de Edificios Artísticos e Históricos". México: Trillas, 2000.

r

**Rangel, J. L. et al.** “Análisis Geotécnico del Gran Basamento de Cacaxtla”. Universidad Autónoma Metropolitana. México: s/f. p. s/n.

**Rangel, J. L. et al.** “Efectos de secado de suelos en construcciones ligeras”. Universidad Autónoma Metropolitana. México: s/f. p. s/n.

**Ray, A.** “Participatory Governance: Addressing the Problem of Rising Groundwater Level in Cities”. En: *Journal of Human Ecology*. Dehli: Kamla-Raj, 2005, No 18 (2). p. 137-147.

**Riegl, A.** "El Moderno Culto a los Monumentos - caracteres y origen". Madrid: La Balsa de la Medusa, Visor Distribuciones S.A., 1987.

s

**Santoyo, E. et al.** “Síntesis Geotécnica de la Cuenca del Valle de México”. Ciudad de México: TGC, Geotecnia S. A., 2005.

**Santoyo, E. y Ovando-Shelley, E.** “Geotechnical considerations for hardening the subsoil in Mexico City’s Metropolitan Cathedral”. En: *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference, Vol. 2*. London: Thomas Telford, 2004. p. 1155-1168.

**Santoyo, E. y Ovando-Shelley, E.** “Cement injections in Mexico City for leveling buildings”. En: *Workshop Passado, Presente e Futuro dos Edifícios da Orla Marítima de Santos*. Santos: 2003. p. 141-179.

**Santoyo, E. y Ovando, E.** “Catedral y Sagrario de la Ciudad de México, Corrección Geométrica y Endurecimiento del Subsuelo”. Resumen del Informe Geotécnico Final de los Trabajos Realizados en el Subsuelo de la Catedral: CONACULTA, TGC. Ciudad de México: TGC, Geotecnia S. A., 2000.

**Santoyo, E. y Ovando, E.** “Catedral y Sagrario de la Ciudad de México, subexcavación y Endurecimiento del Subsuelo”. Ciudad de México: libro no publicado.

**Santoyo, E. y Segovia, J. A.** “Recimentación y Renivelación de Estructuras y Monumentos”. Ciudad de México: TGC, Geotecnia S. A., 1999.

**Santoyo, E.; Ovando, E. y Segovia, J. A.** “Evolución de las Cimentaciones de Edificaciones en la Ciudad de México”. Ciudad de México: TGC, Geotecnia S. A., 1999.

**Secretaría de Hacienda y Crédito Público (SHCP).** "Palacio Nacional, Reflejo vivo de una nación". Dirección General de Promoción Cultural, Obra Pública y Acervo Patrimonial de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público. Santiago de Querétaro: Talleres de Medios Impresos, S.A. de C.V., 2005.

**Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C. y Instituto de Ingeniería, UNAM.** “Vocabulario de Mecánica de Suelos – Términos usados en Latinoamérica”. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C. México: 1977.

**Steenbergen Kajabová, J.; Steenbrink, R. y Habib, H. A. A.** “Innovative restoration of medieval city walls of 's-Hertogenbosch by soil nailing”. En: *The 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Osaka: 2005. p. 1421-1424.

## t

**Tamez, E.** “Ingeniería de Cimentaciones – Conceptos Básicos de la Práctica”. México: TGC, Geotecnia S. A., 2001.

**Tamez, E.; Santoyo, E. y Ovando, E.** “Underexcavation of Mexico City’s Metropolitan Cathedral and Sagrario Church”. En: *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Volume 4*. Hamburg: Publications Committee of XIV ICSMFE, 1997. p. 2105-2126.

## v

**Valdés Krieg, A.** "Concreto al Rescate del Templo de Corpus Christi". En: *Construcción y Tecnología*. México: Enero, 2005. p. 18-25.

**Villagrán García, J. y Del Moral, E.** "Arquitectura y Conservación - Colección Cuadernos de Arquitectura", Vol. 4. México: Dirección de Arquitectura y Conservación del Patrimonio Artístico Inmueble - INBA Editor, 2002.

**Van Tol, A. F.** “Lessons Learned from Jet Grouting at a tunnel project in the Hague (The Netherlands)”. En: Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. *Symposium International sur l’Amélioration des Sols en Place*. Paris: 2004. p. 321-331.

## 8.2. e-book

**Ruskin, John.** "Stones of Venice, Introductions". Project Gutenberg: febrero, 2006 (EBook #9804).

**Ruskin, John.** "The Poetry of Architecture". Project Gutenberg: 16, febrero, 2006 (EBook #17774).

**Ruskin, John.** "Lectures on Architecture and Painting", Delivered at Edinburgh in November 1853. Project Gutenberg: 22, noviembre, 2007 (EBook #23593).

**Vitruvius.** "Ten Books on Architecture". Project Gutenberg: 31, diciembre, 2006 (EBook #20239).

## 8.3. online

Britannica Online Encyclopedia: <http://www.britannica.com/>

Digital Stock Photos: <http://www.gettyimages.com/>

Flickr: <http://www.flickr.com/>

Google Earth: <http://earth.google.com/>

International Council on Monuments and Sites: <http://www.icomos.org/>

Wikipedia: <http://www.wikipedia.org/>

Wikimapia: <http://wikimapia.org/>

# créditos

## 9.1. figuras

número	título	fuelle	página
1.1	Caza de búfalos, Tassili n' Ajjer, Sáhara, Argelia	es.wikipedia.org	1
2.1	Dur-Untash, o Choqa Zanbil, ubicado en Susa, Irán	es.wikipedia.org	6
2.2	Basílica de San Marcos, Venecia, Italia	es.wikipedia.org	8
2.3	Caída del Campanario de San Marcos, Venecia, Italia	en.wikipedia.org	9
2.4	Caras sonrientes en Angkor, Camboya	gettyimages.com	10
2.5	Torre de Pisa, Pisa, Italia	gettyimages.com	11
2.6	Torres de la Basílica de la Soledad, Oaxaca, México	en.wikipedia.org	13
2.7	Templo de la Compañía, Puebla, México	flickr.com	14
2.8	Mosteiro dos Jerónimos, Lisboa, Portugal	flickr.com	15
2.9	Palacio Nacional, ciudad de México, México	foto original de Márcia Oliveira	16
2.10	Antiguo Templo de San Agustín, ciudad de México, México	foto original de Márcia Oliveira	17
2.11	Sant Chad, Wybunbury, Inglaterra	foto original de Efraín ovando	18
2.12	Presa de Pereira a 275 km al sur de Lisboa, en julio de 2005 durante la mayor seca en Portugal y España desde 1940	thewe.cc weplanet garden grows greener	19
2.13	Banqueta en la ciudad de México destruida por un árbol	foto original de Márcia Oliveira	20
2.14	Catedral Metropolitana de la ciudad de México y El Sagrario, México	foto original de Márcia Oliveira	21
2.15	Antiguo Templo de Corpus Christi, ciudad de México, México	foto original de Márcia Oliveira	22
2.16	Casa inundada, Venecia, Italia	flickr.com	24
2.17	Muro romano que rodea Hertogenbosch, Holanda	en.wikipedia.org	25
2.18	Casa de los Azulejos, ciudad de México, México	foto original de Márcia Oliveira	26
2.19	Capilla de las Ánimas, ciudad de México, México	foto original de Márcia Oliveira	27
2.20	Vista del Big Ben y de la entrada del Underground, Londres, Inglaterra	gettyimages.com	28
2.21	Sagrada Familia, Barcelona, España	foto original de Márcia Oliveira	29
3.1	Necrópolis de Giza, ubicada en la meseta de Giza, en las cercanías de Cairo, Egipto	gettyimages.com	32
3.2	Alargamiento de la cimentación existente	figura original de Márcia Oliveira	34

número	título	fuentes	página
3.3	Desmantelamiento de la cimentación existente	figura original de Márcia Oliveira	34
3.4	Esquema de colocación de lastre	figura original de Márcia Oliveira	36
3.5	Procedimiento de la subexcavación usado en la Torre de Pisa (izquierda) y en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México (derecha, bajo el edificio)	figura basada en el original de Santoyo et al (2005) y en Burland, Jamiolkowski y Viggiani (2003)	38
3.6	Procedimiento constructivo de un micropilote tipo TGC	figura original de Márcia Oliveira	40
3.7	Detalle de un manguito, como usado por la empresa TGC	figura basada en el original de Santoyo y Segovia (1999)	41
3.8	Relación fuerza desplazamiento en los cubos de madera de un pilote de control	figura original de Márcia Oliveira	42
3.9	Pilote de control	figura basada en el original de Santoyo y Segovia (1999)	43
3.10	Pilote de control mecánico con funda, tipo TGC	foto original de Santoyo y Ovando (2000)	44
3.11	Pilote con control mecánico y funda	figura basada en el original de Santoyo y Segovia (1999)	45
3.12	Pozo de bombeo, como usado en la Catedral Metropolitana de la ciudad de México	figura basada en el original de Santoyo y Ovando (libro no publicado)	47
3.13	Comportamiento de la arcilla sujeta a bombeo e inyección de agua	figura original de Márcia Oliveira	49
3.14	Principio de la electo-osmosis	figura original de Márcia Oliveira	50
3.15	Esquema de uso de un plano de baja resistencia	figura original de Márcia Oliveira	52
3.16	Detalle de un plano de baja resistencia	figura original de Márcia Oliveira	53
3.17	Procedimiento constructivo del Get-Grout y Deep-Mixing	figura original de Márcia Oliveira	55
3.18	Muro de retención con técnicas de Deep-Mixing	envirocon.com techpapers	55
3.19	Congelamiento del suelo	djc.com special	56
3.20	Láminas de mortero verticales (superior) y horizontales (inferior)	figura original de Márcia Oliveira	57

número	título	fuentes	página
3.21	Mortero vertical	figura basada en el original de Santoyo et al (2005)	58
3.22	Mortero horizontal	figura original de Márcia Oliveira	59
3.23	Cimentación del Palacio de Minería en la ciudad de México, México	figura basada en el original de Auvinet y Rodríguez (2006)	60
3.24	Inclusiones rígidas	figura basada en el original de Auvinet y Rodríguez (2006)	61
4.1	Círculo mágico de Stonehenge, Inglaterra	es.wikipedia.org	66
4.2	Corte geotécnico típico del centro de la ciudad de México	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	68
4.3	Ubicación de los monumentos en el centro histórico de la ciudad de México	figura basada en mapa de Google Earth	69
4.4	Planta esquemática del complejo religioso y etapas de construcción y demolición de todas las dependencias	figura basada en el original de Santoyo y Ovando (2000)	70
4.5	Planta y corte esquemáticos de las cimentaciones de la Catedral Metropolitana y de El Sagrario	figura basada en el original de Santoyo y Ovando (2000)	71
4.6	Curvas de igual velocidad de asentamientos en mm/año	figura basada en el original de Santoyo y Ovando (2000)	72
4.7	Imágenes de la subexcavación de la Catedral Metropolitana y de El Sagrario	figura basada en el original de Santoyo y Ovando (2000)	73
4.8	Mediciones recientes de las curvas de igual velocidad de asentamientos en mm/año	figura original de TGC	74
4.9	Comparación de velocidades de hundimiento anual en mm	figura original de TGC	75
4.10	Ubicación y planta de la Capilla de las Ánimas	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	76
4.11	Vista del muro norte de la Capilla de las Ánimas	foto original de Márcia Oliveira	77
4.12	Hundimientos de algunos puntos de control en las contratraves de cimentación de la Capilla de las Ánimas	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	78

número	título	fuentes	página
4.13	Planta de la cimentación de la Capilla de las Ánimas, con las interferencias e intervenciones realizadas	figura basada en el original de Santoyo y Ovando (2000)	79
4.14	Planta esquemática del Antiguo Templo de San Agustín	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	80
4.15	Curvas de igual velocidad de hundimiento diferencial, en mm/año, antes de las intervenciones	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	81
4.16	Etapas de inyección en el antiguo templo de San Agustín	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	82
4.17	Curvas de igual velocidad de hundimiento diferencial, en mm/año, después de las intervenciones	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	83
4.18	Planta de la Casa de los Azulejos y edificios colindantes	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	84
4.19	Previsión de la distorsión angular en la estructura	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	85
4.20	Ubicación de los pozos de inyección de agua	figura basada en el original de Ovando Shelley, Pinto de Oliveira y Santoyo (2007)	86
4.21	Vista de parte de la fachada norte del monumento	figura original de Márcia Oliveira	87
4.22	Recimentación del Antiguo Templo de Corpus Christi	figura basada en el original de TGC	88
4.23	Perfil de suelo con base en los resultados de sondeos y pruebas de piezocono	figura basada en el original de Gottardi y Tonni (2005)	89
4.24	Proyecto original de la Basílica (dibujo de A. Pellanda)	basilicasanmarco.it	90
4.25	Sección actual del atrio occidental e interior de la iglesia	basilicasanmarco.it	91

número	título	fuentes	página
4.26	El colapso del Campanario	en.wikipedia.org	92
4.27	La reconstrucción del Campanario	en.wikipedia.org	93
4.28	El Campanario en la actualidad	en.wikipedia.org	94
4.29	Corte geotécnico bajo la Torre de Pisa	figura basada en el original de Ovando y Santoyo (2003)	95
4.30	Alzado y sección transversal de la Torre de Pisa	figura basada en el original de Ovando y Santoyo (2003)	96
4.31	Fases de construcción de la Torre de Pisa	figura basada en el original de Burland, Jamiolkowski y Viggiani (2003)	97
4.32	Lastre en la Torre de Pisa	figura basada en el original de Burghignoli, Jamiolkowski y Viggiani (2007)	98
4.33	Esquema de anclas temporales	figura basada en el original de Jamiolkowski et al, 1999	99
4.34	Localización de los tubos para extracción del suelo en la Torre de Pisa	figura basada en el original de Burland, Jamiolkowski y Viggiani (2003)	101
4.35	Localización de la zona del muro sujeta a intervención	figura basada en el original de Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib (2005)	102
4.36	Condición geotécnica en el muro	figura basada en el original de Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib (2005)	103
4.37	Equipo de anclaje del muro romano	foto original de Steenbergen Kajabová, Steenbrink y Habib (2005)	104
4.38	Localización de las bibliotecas en el Templo Bayon, Angkor Thom	figura basada en el original de Iwasaki (2005)	106
4.39	Corte de la cimentación en el lado oeste de la biblioteca norte	figura basada en el original de Iwasaki (2005)	107
4.40	Biblioteca norte del templo antes de la restauración	mofa.go.jp Angkor project	108
4.41	Biblioteca norte del templo después de la restauración	mofa.go.jp Angkor project	109

número	título	fuentes	página
4.42	Vista del Palacio de Westminster y de la Torre del Reloj desde el puente de Westminster	en.wikipedia.org	110
4.43	Sección transversal en la estación Westminster y la Torre Big Ben	figura basada en el original de Burland (2002)	111
4.44	Plano de la torre de Sant Chad	figura basada en el original de Johnston y Burland (2001)	112
5.1	Coliseo de Roma, Italia	es.wikipedia.org	115
5.2	Garisenda (izquierda) y Asinelli (derecha) en Boloña, Italia	es.wikipedia.org	117
5.3	Ghirlandina, Modena, Italia	en.wikipedia.org	118
6.1	Grabado en cobre alusivo al Terremoto de 1755 en Lisboa, Portugal	pt.wikipedia.org	127
7.1	Retrato de Viollet-le-Duc	es.wikipedia.org	133
7.2	Ruskin como Profesor de Arte en Oxford	en.wikipedia.org	134
7.3	Camilo Boito	en.wikipedia.org	135
7.4	Alöis Riegl	en.wikipedia.org	136
7.5	Cesare Brandi	www.cesarebrandi.org	137
5.9	Quimeras en la fachada de la Catedral de Notre-Dame, Paris, Francia	es.wikipedia.org	139

## 9.2. tablas

número	título	página
2.1	Origen de los asentamientos diferenciales y factores de influencia	31
3.1	Medidas para prevenir los efectos nocivos de los asentamientos diferenciales	63
3.2	Medidas para corregir los efectos nocivos de los asentamientos diferenciales	65
4.1	Secuencia geotécnica en el centro histórico de la ciudad de México	68
4.2	Secuencia geotécnica del suelo de Venecia	89
4.3	Secuencia geotécnica de la Torre de Pisa	95
5.1	Algunas definiciones para los postulados de la teoría del arte invisible	125

### 9.3. agradecimientos

Agradezco a mi familia y amigos por el apoyo y el empujón hacia el avión, con la finalidad de atravesar el Atlántico y aterrizar en México para estudiar.

A este país que me ha tratado como suya... y a todos que en él están, que han sido mi segunda familia, amigos, casa... Especialmente a mi tutor por el apoyo y paciencia con su educanda desalineada.

A la UNAM por brindar una enseñanza de calidad... A la Secretaria de Relaciones Exteriores del Gobierno de México y al Instituto de Ingeniería por el apoyo económico que me sustentó.