

Las intervenciones en la Torre campanario de Pisa: entre integraciones y liberaciones

Intervention on the Leaning Tower bell of Pisa: Between integrations and disengagement

Resumen

Existen numerosas soluciones técnicas para la intervención de edificios patrimoniales que sirven para evitar o reducir la degradación. Aunque estas cuenten con experiencias satisfactorias, no son garantía para tipificarlas. Para explicar este curioso hecho, se recurrió al estudio de las intervenciones realizadas en el transcurso de la historia en la Torre Campanario de la Catedral de Pisa. Este emblemático edificio ha experimentado asentamientos diferenciales desde su construcción, generando su inclinación por lo que es internacionalmente conocida. Durante el transcurso de su existencia ha sido escenario de diferentes tipos de intervenciones, en su mayoría integraciones y liberaciones. Se presenta una revisión sistemática sobre las diferentes y más representativas acciones de intervención, para conocer cómo estas han influido en la variación de su estado de degradación. No todas las acciones implementadas tuvieron éxito. La experimentación en sitio controlada, con modelos a escala, hasta el momento es la vía segura en las intervenciones.

Palabras clave: torre; arquitectura; conservación; patrimonio; monumentos.

Abstract:

There are numerous technical solutions to intervention of heritage buildings that are useful to avoid or reduce degradation. Although these solutions have satisfactory experiences, they are not a guarantee to generalize them. To explain this curious fact, this study of the interventions was carried out in the course of history in the Bell Tower of the Cathedral of Pisa. This emblematic building has experienced differential settlements since its construction, generating its inclination for what is internationally known. During course of its existence, it has been a scenario of different types of interventions, mostly integrations and releases. A systematic review is presented on the different and most representative intervention actions, to know how these have influenced the variation of its state of degradation. Not all actions implemented were successful. Controlled on-site experimentation, with scale models, has so far been the safest way to intervention.

Keywords: tower; architecture; conservation; heritage; monuments.

Autor:

Luis Carlos Cruz-Ramírez*
luisram06@gmail.com

*Escuela Superior de Ingeniería
y Arquitectura, Unidad
Tecamachalco, Instituto
Politécnico Nacional

México

Recibido: 21/Ene/2022
Aceptado: 25/May/2022

1. Introducción

En textos especializados -tales como Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2006), Broto, (2006) o Atkinson (2003)-, sobre el mantenimiento, reparación y consolidación de construcciones, se puede encontrar una serie de recomendaciones para la intervención de edificios ante la degradación¹. También es posible encontrar estudios -como Croce (2021), Michiels (2015), Delgado (2016, 2021, 2022) o Costa et al. (2014, 2018)- con resultados de nuevos tratamientos o aplicación de métodos experimentales para la recuperación de las construcciones. Esta literatura contiene un conjunto de técnicas aplicables a diferentes categorías de problemas comunes.

Entre los diferentes tipos de agentes que generan la degradación de los edificios, existe un problema particular que merece especial atención. Este es el caso de los *asentamientos diferenciales*, término asignado en la ingeniería estructural en el cual diferentes partes de la cimentación de un edificio experimentan asentamientos de manera desigual (Das, 1999). Dicho fenómeno ocurre en numerosas construcciones alrededor del mundo, comúnmente en zonas lacustres. Suele ser característico en ciudades como Pisa, Venecia o Ciudad de México, debido a las características locales de sus suelos.

Los asentamientos diferenciales comúnmente están asociados a dos posibles escenarios: la heterogeneidad del subsuelo y la existencia de condiciones de carga ampliamente variadas en una cimentación superficial (Das, 1999). El problema surge debido a la naturaleza aleatoria de los suelos. Sus propiedades físicas y químicas varían espacialmente (Wu et al., 2019), lo que incide en que la magnitud de los asentamientos diferenciales sea aleatoria y desconocida (Naghbi et al., 2021). Además, este hecho no es identificado de forma temprana en las construcciones, debido a que solo es perceptible hasta el paso de los años con la inclinación de las construcciones y porque se trata de un hecho poco frecuente, del cual raras veces se tiene sospecha que pueda ser el agente de degradación (Atkinson, 2003; Watt, 1999/2007; Olanrewaju et al., 2022).

Los asentamientos diferenciales se encuentran clasificados como uno de los principales factores del colapso total de los edificios (Hamma-Adama et al., 2020; Namdar et al., 2019) y las inversiones económicas para reparar los daños estructurales suelen ser tan costosas que las construcciones terminan siendo demolidas (Karimi et al., 2018) ante el peligro de ser un factor de pérdidas

humanas. La demolición total no es una alternativa cuando se trata de un edificio patrimonial que se desea conservar.

El mejoramiento de los suelos es el primer paso para tratar este tipo de lesiones constructivas (Sánchez et al., 2018). Ante la interrogante de ¿cómo intervenir edificios patrimoniales con asentamientos diferenciales?, la respuesta promedio suele ser -entre algunos profesionales- implementar una serie de acciones -tales como realizar inyecciones químicas- en los estratos de suelos, en la cimentación; algo que, en la mayoría de las ocasiones, se reduce a la técnica tradicional de la integración de concreto con aditivos (Sánchez et al., 2018). Pero ¿realmente siempre funciona este tipo de acciones de intervención? En un contexto generalizado, este problema se puede formular de la siguiente manera: ¿son siempre eficaces las intervenciones para evitar la degradación de los edificios patrimoniales?

El objetivo de este artículo es presentar cómo las intervenciones en edificios, precisamente las ejecutadas en cimentaciones, no pueden ser tomadas como soluciones tipificadas y mostrar los problemas de generalizar estas soluciones. Para explicar este curioso hecho, se recurrió al análisis del caso de las intervenciones en la Torre Campanario de la Catedral de Pisa. La Torre de Pisa es una torre de tipo aislada, con cimentaciones superficiales, emplazada en un lugar donde las propiedades mecánicas del suelo no son homogéneas (Fiorentino et al., 2018; Geng et al., 2020). Esto lo convierte en un caso de interés, debido a que se presentan los dos escenarios comunes para la existencia de asentamiento diferencial.

Por otro lado, las torres construidas con mampostería -como es el caso de la Torre de Pisa- comúnmente experimentan tres problemas tipificados: inclinación, desarticulación de sus piezas y aplastamiento (Croci, 2001). La inclinación de las torres, suele producirse por la deficiencia en la resistencia y carencia de rigidez de la cimentación, ocasionada por la fluencia del suelo (D'Altri et al., 2018). Lo anterior genera un asentamiento diferencial que tiende a cambiar la posición y distribución de las cargas gravitatorias, generando momentos por la excentricidad en el centro de gravedad². Además, la inclinación conduce al colapso en dos escenarios de riesgo: el colapso por volteo y el colapso por fractura en la mampostería de los primeros niveles (Kouris et al., 2021). Cuando la proyección en la base del centro de gravedad se sale, esta llega a la arista, entonces, el más ligero movimiento lateral produciría el volteo (Heyman, 1995/1999). Al aumentar el ángulo de inclinación, el momento produce tensión y compresión en los extremos opuestos de la base, en los cuales la compresión produce aplastamiento y la tensión en las mamposterías produce agrietamientos y fisuras, generando la desarticulación por el desprendimiento de secciones del edificio (Croci, 2001; Kouris et al., 2021).

² Esto incide en el surgimiento de dos efectos cíclicos en el tiempo -el aumento la inclinación, que incrementa la excentricidad del centro de gravedad que, a su vez, genera un momento de volteo y estimula el incremento nuevamente de la inclinación-; fenómeno similar al proceso cíclico de la variación de la deformación seguido de la variación de momento en el pandeo de columnas -conocidos como pandeo y colapso progresivo, explicado en la mecánica-.

¹ La degradación es el proceso en el cual un objeto o material pierde de manera gradual sus propiedades o cualidades.

Estos tres problemas mencionados han estado presentes en la Torre de Pisa. El principal, y por lo que es internacionalmente conocido dicho monumento, es su inclinación, producto de los asentamientos diferenciales que ha experimentado desde su construcción. Esto ha generado que, durante el transcurso de su existencia, haya sido escenario de diferentes tipos de intervenciones.

La hipótesis es que las intervenciones no siempre suelen mejorar las condiciones del edificio. Por muy conocidas que sean en la disciplina constructiva, o por el hecho que hayan funcionado en otro edificio, no siempre está garantizada su efectividad. Tampoco se puede alegar a las experiencias personales, porque se cae en el error del sesgo anecdótico. Por lo anterior, no se pueden tomar como soluciones las deterministas. Particularmente, las soluciones ante el fenómeno de los asentamientos diferenciales, no suelen ser genéricas.

La utilidad de este estudio recae en la necesidad de reconocer las posibles soluciones existentes en la literatura y en otros casos de estudios, sean consideradas como recomendaciones que deben ser cuidadosamente evaluadas antes de implementarse. Por otro lado, analizar la historia de las intervenciones de este hito de la conservación arquitectónica-ingenieril, puede ser de utilidad para conocer la incertidumbre que realmente existe en relación a la efectividad de la aplicación de propuestas para la recuperación de edificios.

2. Métodos

El objeto de estudio seleccionado fue la Torre Campanario de la Catedral de Pisa. Pisa es una ciudad localizada en la Región Toscana, en Italia. En la Figura 1 se puede observar la localización de La Torre de Pisa, en la Piazza dei Miracoli ($43^{\circ}43'23''N$ $10^{\circ}23'48''E$). Es una construcción medieval, relevante en la actualidad porque socialmente es reconocida como patrimonio de la humanidad (UNESCO, 2021). Tiene siete niveles más una cámara de campanas localizada en la cúspide. Su altura aproximadamente es de 58,6 m, desde el nivel de la cimentación, o 55 m desde

el nivel del suelo (Jamiolkowski y Viggiani, 2007), con un diámetro de 19,6 m en planta (Burland, 2014). Es de forma cilíndrica y hueca en el centro, soportada por 15 semicolumnas adosadas al muro en primera planta, con un diseño poco común para la época (Ronzani y Ascani, 2011; Ascani, 2014). En la Figura 2 se puede observar la sección de la torre.

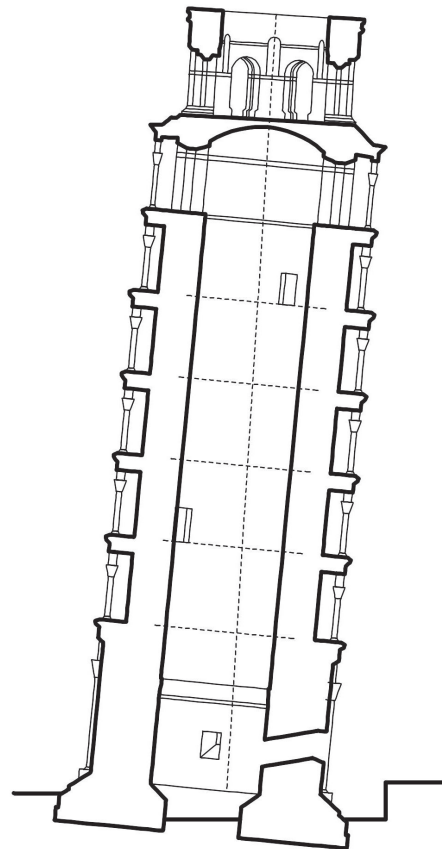


Figura 2: Sección de la torre

Fuente: Fuente: Elaboración propia (2017) con base en Burland (2008)

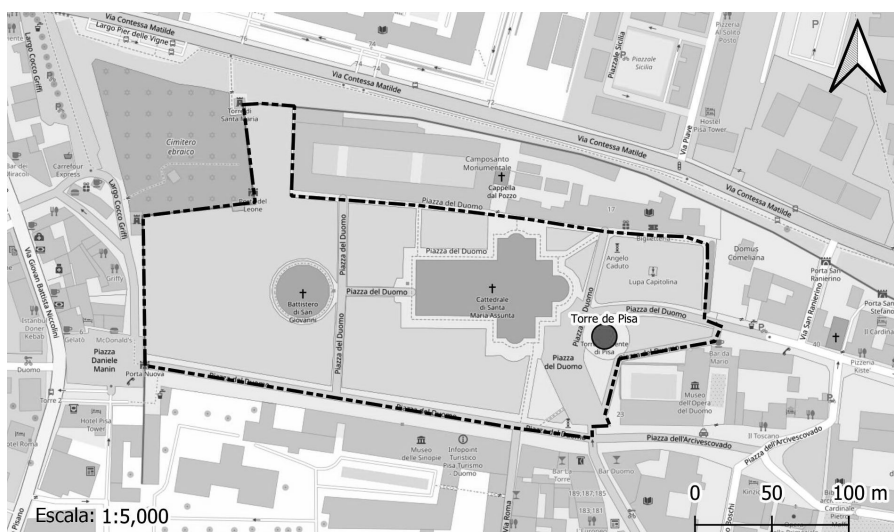


Figura 1: Localización de la Torre Campanario de la Catedral de Pisa

Fuente: Elaboración propia (2022)

El muro perimetral es de piedra caliza, aglomerados con mortero y recubierto de mármol. Entre los dos muros se encuentra una escalera interna en forma helicoidal que va desde la planta baja hasta el séptimo nivel, en donde se encuentra otra escalera en helicoidal, de menor dimensión, que lleva a la plataforma de la cámara del campanario, detalles que se pueden observar en la Figura 3.

Los cimientos tienen una profundidad de 5.5 m. Están compuestos por bloques de piedras rellenos con piezas pétreas de menor dimensión aglomeradas con mortero de cal. La cimentación sigue la proyección de los muros en forma circunferencial en planta y escarpados por el lado exterior, con un diámetro de 19.6 m.

La Torre de Pisa está cimentada sobre un suelo, compuesto por tres capas: A, B y C. Estas se muestran en la Figura 4. La capa A de suelo (10 m) está compuesta por arena y arcilla limosa. La segunda capa B, que llega hasta los 40 m de profundidad, contiene cuatro estratos: dos estratos de arcilla sobre, sobre un ligero estrato de arena y finalmente otro estrato de arcilla. Finalmente, la tercera capa C de arena, llega hasta los 60 metros (Calabresi & Carlo, 1991; Bajaj & Choudhary, 2014). La capa más débil es la capa B.

La construcción de la Torre de Pisa fue ejecutada en tres etapas, entre los años 1173-1370 (Fletcher, 1905/1996). Cada etapa experimentó interrupciones de varias décadas. La primera etapa inició en 1173 y duró cinco años. Fue ejecutada por Bonanno Pisano, quien construyó los primeros cuatro niveles. En 1178 llegó la primera suspensión –por razones desconocidas– (Burland, 2008). La segunda etapa inició en 1271 y duró seis años bajo la dirección del arquitecto Giovanni Di Simone, que construyó tres niveles más, para alcanzar una altura de siete niveles, pero en 1278 llegó la segunda suspensión a causa de una guerra perdida contra Génova –la Batalla de Meloria– (Bajaj y Choudhary, 2014, p. 81; Jamiolkowski y Viggiani, 2007). Finalmente, la tercera etapa inició en 1360, esta vez construida por Tomasso Pisano; duró diez años y se concluyó la obra con la construcción de la cámara del campanario (Caldelli y Meucci, 2005/2010). En la Figura 5 se presenta la apariencia en cada una de las etapas constructivas de la torre.

Contrario al mito popular, que indica que fue construida con una inclinación por extravagancia o por originalidad de los diseñadores –mitos documentados y refutados por Caldelli y Meucci (2005/2010)–, la realidad es que esta torre se fue inclinando con el tiempo (pp. 21-24). En su momento fue aplomada, alineada y nivelada, al igual que muchos otros edificios construidos en la misma época.

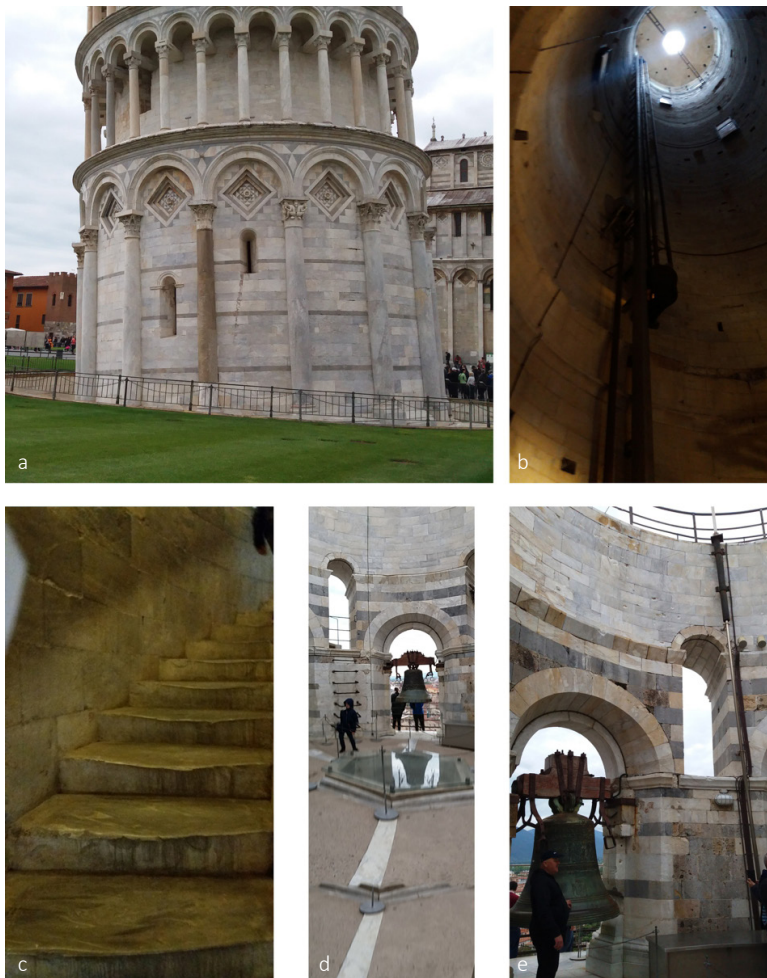


Figura 3: (a) Primera planta, (b) hueco interior de la torre, (c) Escaleras helicoidal, (d) y (e) Cámara del campanario
Fuente: Elaboración propia (2021)

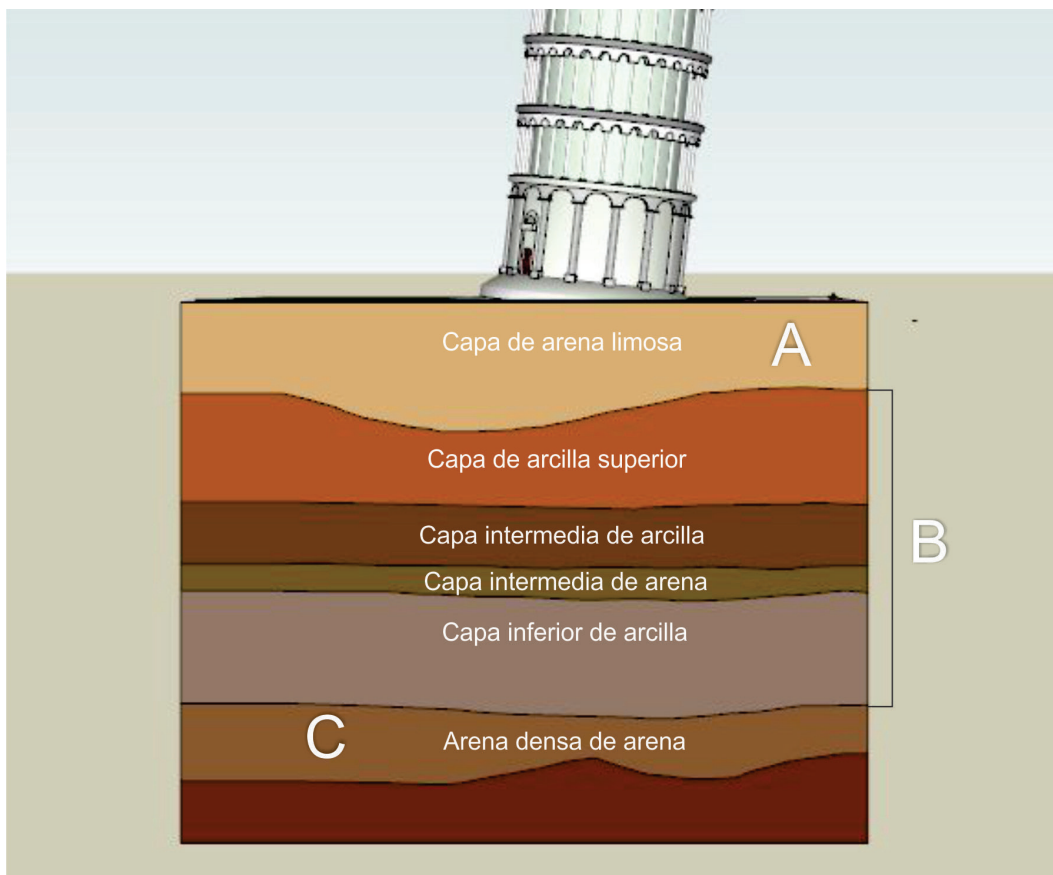


Figura 4: Estratos del subsuelo

Fuente: Elaboración propia (2021) con base en Burland (2003) y Alex (2021)

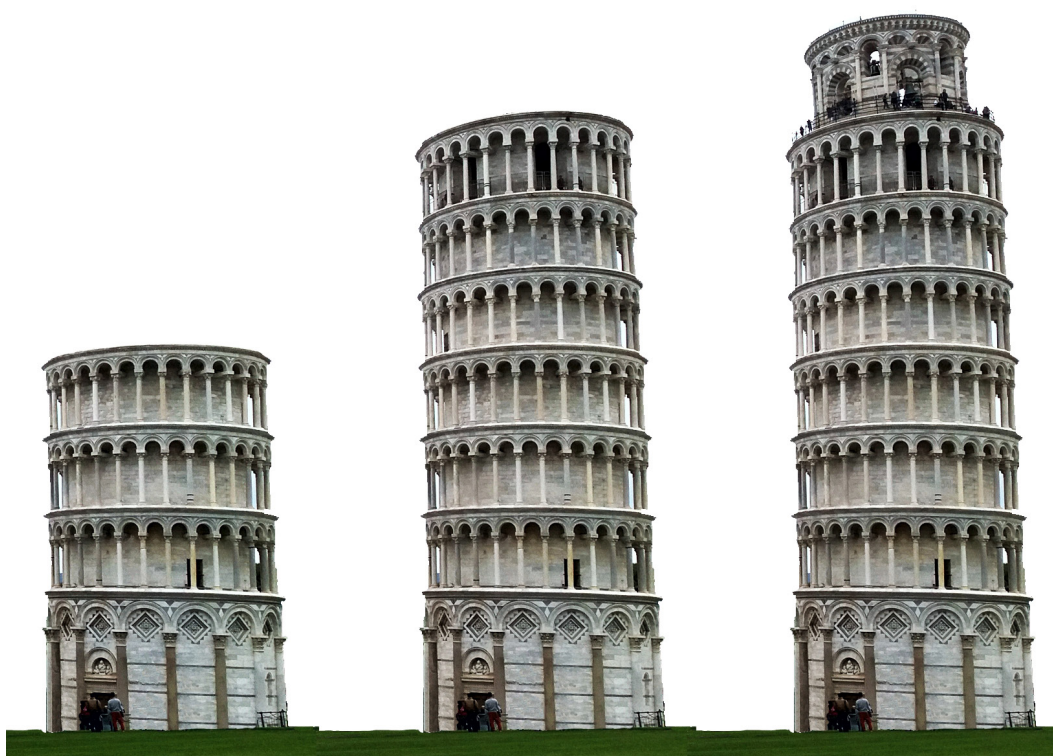


Figura 5: Proceso constructivo progresivo de la Torre de Pisa

Fuente: Elaboración propia (2021)

El problema planteado se basa en una relación de variaciones: la variación de intervenciones, para variar los escenarios de degradación. Entiéndase por intervención arquitectónica a cualquier forma de actuación sobre un edificio, para evitar su degradación –acciones como restaurar, defender, preservar, conservar o reutilizar, entre otras– (Solà-Morales, 2006). La variable “intervenciones” se pueden clasificar en liberaciones, consolidaciones, integraciones y reintegraciones (UNESCO, 1964). En este estudio, la variación de la intervención se presenta de dos formas: integraciones y liberaciones. La variable degradación puede tomar decenas de valores, pero en el contexto de este estudio, el principal es la inclinación. Esta, a su vez, está asociada a la desarticulación de las mamposterías, que se evidencia por el desprendimiento de las piezas en la zona a tensión, a causa de fisuras y grietas, además del efecto del aplastamiento en su zona a compresión. Por lo anterior, la variación de la degradación toma los valores de inclinación, desarticulación, desprendimiento, fisuras, agrietamientos y aplastamiento de mamposterías.

Por tratarse de sucesos pasados, para conocer los detalles se realizó una revisión documental en la que se prestó especial atención a los artículos y reportes técnicos publicados por los principales actores que participaron en las etapas de intervención de la torre: Burland (2008, 2014), Croci (2001, 2012), Jamiolkowski y Viggiani (2007), Burland et al. (2003), Lodigiani y Macchi (2005) y Jamiolkowski et al. (1993). Asimismo, se puso especial atención en los registros elaborados por cronistas, historiadores y periodistas locales, en donde se destaca la obra de Caldelli y Meucci (2005/2010). El edificio fue visitado en una ocasión para registrar de forma directa –en la medida de lo posible– detalles identificados en la revisión de literatura. Las intervenciones registradas se ordenaron de forma cronológica. Luego, se describen haciendo énfasis en la relación acción-efecto producido, el factor que constantemente se encontró, para evaluar la posible eficiencia de la intervención es la variación de la inclinación de la torre. Las principales implicaciones de las intervenciones en la inclinación del edificio se presentan en el siguiente apartado.

3. Resultados

La Torre de Pisa experimentó asentamientos desde su construcción. Estos se hicieron visibles a menos de una década de terminada su primera etapa constructiva (Castex, 2008). La causa principal es atribuida al ineficaz diseño de la cimentación (Bajaj y Choudhary, 2014; Atkinson, 2003) ante la debilidad del subsuelo para soportar las cargas de la torre (Burland, 2008; Jamiolkowski y Viggiani, 2007).

En 1185, cuando el arquitecto en turno identificó los primeros asentamientos –del lado sur– ordenó a los constructores colocar contrapesos en el piso más alto, del lado contrario a la inclinación (Bajaj y Choudhary, 2014): una integración correctiva de masa sobrepuesta. Como resultado, la torre terminó inclinándose del lado opuesto: hacia el lado norte. Fue una intervención ineficaz. Los expertos consideran que, si la obra de construcción no se hubiera suspendido, probablemente hubiese colapsado (Burland et al., 2003; Burland, 2008).

Al inicio de la segunda etapa constructiva – en el año 1272–, la torre ya había experimentado una ligera inclinación hacia el lado norte, de 0.2° aproximadamente (Burland, 2008, p. 175; Jamiolkowski y Viggiani, 2007) (Figura 6).

Durante esta etapa, los constructores intentaron corregir la inclinación que la torre tenía en sus primeros niveles, alineando los muros nuevos, de los siguientes niveles, con respecto al eje gravitatorio (Croci, 2001). La alineación de los muros nuevos influyó en la forma de la torre, ya que, al integrar los siguientes tres niveles –desde el cuarto nivel en adelante–, estos fueron construidos con una curvatura, en un intento de compensar la inclinación por el asentamiento (Caldelli y Meucci, 2005/2010). Al finalizar esta etapa la torre se había inclinado, ahora hacia el lado sur, 0.6° aproximadamente, por dicha maniobra constructiva (Croci, 2001; Jamiolkowski y Viggiani, 2007) (Figura 5). Una serie de estudios realizados por el equipo de expertos en la segunda mitad del siglo XX, indican

Gráfica de inclinación en grados en el transcurso de los años

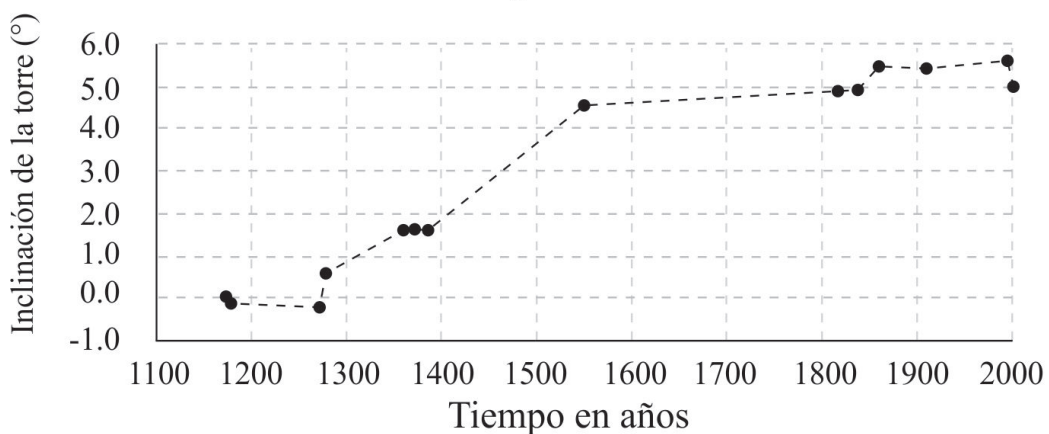


Figura 6: Asentamiento progresivo en el tiempo. Los grados de inclinación positivos indican la dirección hacia el lado norte. La inclinación negativa es hacia el lado sur

Fuente: Elaborada por el autor (2022) con datos extraídos de Marchi (2008), Jamiolkowski y Viggiani (2007), Burland (2008) y Squeglia y Bentivoglio (2014)

que este cambio en la dirección de la inclinación fue debido a que los estratos de suelo del lado sur son más compresibles que los existentes del lado norte (Bajaj y Choudhary, 2014).

La tercera etapa añadió el peso de las campanas, además de los muros y arcos de la cámara del campanario, cuyo efecto fue el incremento de la presión en el suelo y el asentamiento progresivo durante siglos. No existen registros del asentamiento desde finales de la tercera etapa hasta el siglo XIX. Algunas hipótesis de inclinación fueron inferidas de pinturas –de Antonio Veneziano, en 1385– o documentos –Giorgio Vasari, en 1566, quien realizó algunas medidas– (Caldelli y Meucci, 2005/2010).

En el año 1817, dos arquitectos ingleses, Cressy y Taylor, evaluaron la inclinación de la torre, obteniendo una medida de 5° por el lado sur (Figura 5) (Squeglia y Bentivoglio, 2014; Jamiolkowski y Viggiani, 2007). Otro estudio fue realizado en el año 1859, por Rohault de Fleury, quien registró un ángulo de 5.4°. Este notable incremento en la inclinación, fue debido a una intervención ejecutada con fines estéticos. Esta fue realizada en el año 1838, por el arquitecto Alessandro Gherardesca, quien excavó alrededor de la torre para crear un andador, conocido como catino-cuenco-, para dejar expuestos los plintos de las columnas (Burland et al., 2003) (Figura 5). Después de la exploración de Fleury, la siguiente medida fue obtenida en 1911, cuando se registró una inclinación de 5.43° (Figura 5) (Calabresi y Carlo, 1991; Bajaj y Choudhary, 2014).

La siguiente intervención fue ejecutada en el año 1934. Las obras tuvieron dos objetivos: reforzar la cimentación e impermeabilizar el andador (Caldelli y Meucci, 2005/2010). Realizaron una integración por inyección de concreto en el subsuelo –cerca de 90 toneladas–, por medio de una serie de perforaciones en la cimentación existente, para evitar el asentamiento diferencial progresivo (Burland, 2008). Los resultados no fueron los esperados. Esta cantidad de concreto sobrecargó el cimiento y provocó una inclinación entre 31”- 33” (Figura 5) (Calabresi y Carlo, 1991; Burland, 2008). Aunque se produjo este efecto inesperado, se controló la aceleración de la inclinación por algunas décadas.

El siguiente ciclo de intervención se realizó hasta la década de 1990. Pero antes, es necesario mencionar algunos hechos relevantes. Primero, en 1965 se formó una comisión que se encargó de documentar la historia, procesos constructivos, forma, estructura y la exploración de los cimientos, datos necesarios para entender las condiciones de la torre y posteriormente abrir y evaluar un concurso para su consolidación (Calabresi y Carlo, 1991; Caldelli y Meucci, 2005/2010). Aunque el concurso tuvo respuesta –21 propuestas– ninguna fue aprobada por la falta de garantía en la seguridad durante la etapa constructiva (Calabresi y Carlo, 1991; Caldelli y Meucci, 2005/2010), y la posible alteración en la integridad del monumento –para esta fecha ya se habían publicado los acuerdos de la Carta de Venecia (International Council of Monuments and Sites [ICOMOS], 1964)–. Luego, en 1972, en Pisa ocurrió una sequía, en la que bombearon el agua del subsuelo, lo que aceleró de la inclinación de la torre (Burland, 2008). Este hecho, en conjunto con los resultados de los estudios geotécnicos de la comisión de 1965, permitió recontextualizar el problema.

Lograron conocer que el suelo estaba compuesto por sedimentos aluviales de una laguna extinta, además de la existencia de una serie de canales subterráneos (Jamiolkowski et al., 1993). También observaron otros dos fenómenos: (a) que la torre aumentaba de inclinación entre las estaciones lluviosas –que van de agosto a enero– con un índice de 1.2 mm por año y (b) que, durante el trascurso de un día soleado, el efecto de dilatación térmica producía rotaciones que incidían en el aumento de la inclinación, que era revertida durante el mismo día, produciendo la misma inclinación –1.2mm, entre 5”y 6” (segundos)– que la que se producía de forma permanente durante un año (Jamiolkowski et al., 1993; Caldelli y Meucci, 2005/2010; Burland, 2008).

En 1990 se formó otra comisión para la recuperación del monumento (Burland, 2008), quienes definieron dos criterios de básicos para la conservación: no alterar la unidad e integridad del monumento y preservar las características históricas y artísticas del mismo.

La rotación de la torre durante el día hacía que el costado norte emergiera. Ante este problema, en 1993, la solución fue integrar un conjunto de contrapesos³ por el lado norte, para reducir el momento de volteo (Burland, 2008). En la Figura 7 se muestra la colocación de los contrapesos. El proceso inició con la integración de una viga temporal de concreto presforzado en forma de anillo alrededor de la base de la torre, (Jamiolkowski y Viggiani, 2007; Lodigiani y Macchi, 2005). Esta viga servía de plataforma, sobre la que se colocaron un conjunto de lingotes de plomo por el lado norte de la cimentación (Caldelli y Meucci, 2005/2010). En total 760 T. en 1993 y 900 T. en 1995 (Crocchi, 2001). Se utilizó plomo, porque es un metal denso, lo que permitía colocar más peso en menos volumen. Esta intervención logró la disminución del momento de volteo en un 20% (Crocchi, 2001), y 52” de inclinación (3%) (Bajaj y Choudhary, 2014). El único defecto de esta acción fue de carácter estético –por la alteración al paisaje–, lo que dejó abierta la implementación de otras medidas.

Otra alternativa-finalmente no ejecutada- fue propuesta por Leonhardt, en 1979, que consistió en integrar una losa de concreto reforzado, con 32 anclajes en el lado norte, que llegaría hasta los 45 metros de profundidad, en la capa del subsuelo que es más estable, y a su vez, estarían anclados en la superficie por medio de una viga de concreto potenciado (Caldelli y Meucci, 2005/2010; Burland, 2008) –un sistema de anclajes que ya se había utilizado en la Catedral de la Ciudad de México, después del sismo de 1985–. Un esquema de esta propuesta se muestra en la Figura 8. Esta idea fue adaptada en 1995, pero reducida a 10 anclajes con una viga que estaría conectada a la cimentación, colocada por debajo del nivel del suelo del catino, para que no fuese visible.

La intervención implicaba la excavación alrededor del catino por la parte norte y sur –tarea complicada y delicada, por lo ya conocido con la intervención de Gherardesca, en 1838–. Entonces, para realizar esta tarea, primero intentaron estabilizar el suelo con la implementación de nitrógeno líquido por 36 horas, para

³ Los contrapesos se consideraron como solución porque el suelo estaba emergiendo.

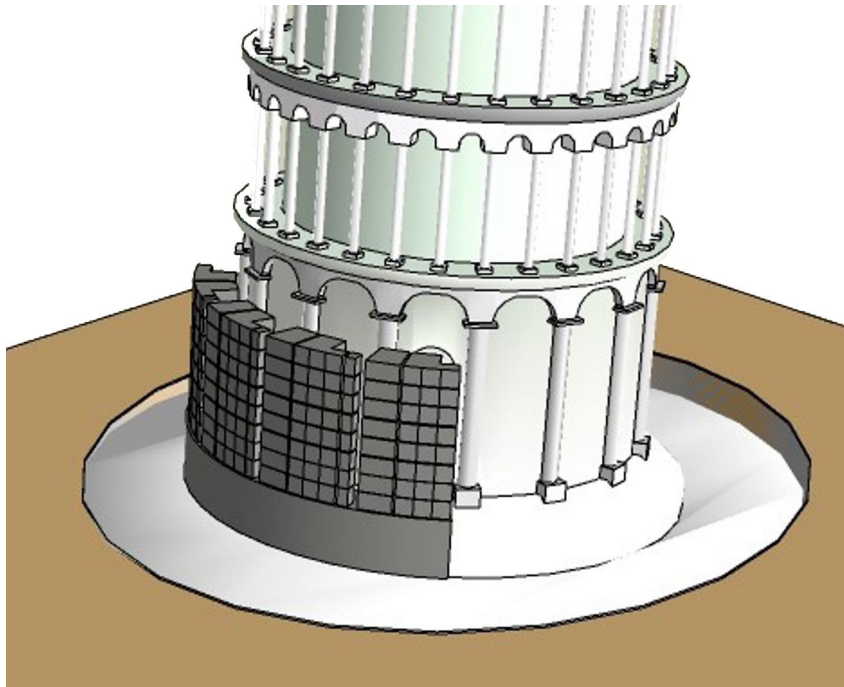


Figura 7: Integración de viga de concreto y contrapesos de plomo
Fuente: Elaboración propia (2021) con base en Burland (2003) y Alex (2021)

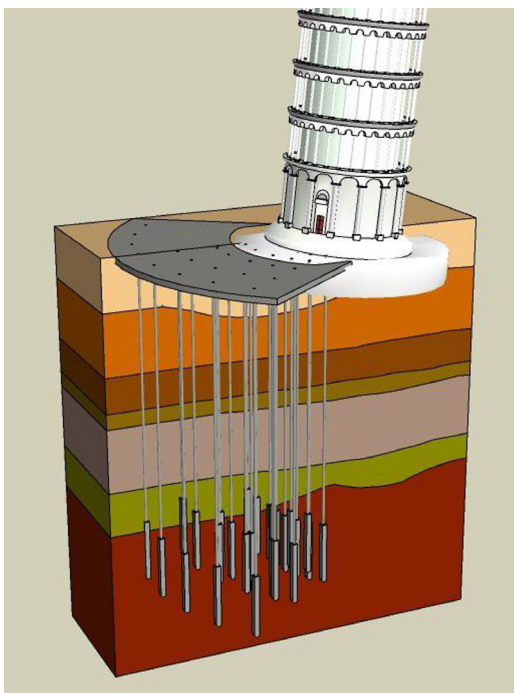


Figura 8: Losa de concreto reforzado con anclajes
Fuente: Elaboración propia (2021) con base en Burland (2003) y Alex (2021)

congelar el subsuelo que contenía agua –técnica ya conocida y utilizada en Londres para la construcción del metro– (Burland, 2008). La ejecución de esta maniobra fue suspendida porque generó una inclinación de 11" del lado sur, además que la torre dejó de rotar y, al terminar el proceso de enfriamiento, se registró otro incremento

en la rotación de 4" (Caldelli y Meucci, 2005/2010). Para mitigar este problema, colocaron 900 T de contrapeso extra (Crocì, 2001), como la acción implementada en 1993. Como consecuencia, la inclinación de la torre aumentó hasta 7" más por el lado sur.

A finales de 1998, los expertos iniciaron los preparativos para otro proceso de intervención, que finalmente ha sido el más efectivo: la sub-excavación. Este procedimiento tiene sus antecedentes en un par de artículos elaborados por Terracina (1961, 1962). El fundamento era el siguiente: debido a la diferencia en la consistencia del suelo debajo de la torre, aunado con el hecho que también existía una inequidad en las presiones de contacto, dedujo que la solución no estaba en reforzar el suelo, sino en cambiar la inclinación de la torre en un 10%, para regresar todas las presiones a los valores correspondientes de equilibrio (Terracina, 1962). Terracina indicaba que dicha corrección de la inclinación se podría lograr removiendo material del subsuelo del lado norte (1962, p. 339). Esta propuesta se sustentaba en modelos analíticos.

En resumen, el procedimiento consiste en extraer, de forma controlada, porciones de suelo que se encuentran debajo de la cimentación de la torre, en la parte no asentada, para lograr el descenso y nivelar el asentamiento del lado contrario del edificio. Estos pequeños túneles, generados con unos taladros que hacen perforaciones radiales, serían cerrados por el mismo suelo que existe en la parte superior de la oquedad generada, que, por la fuerza de acción de la misma masa de la torre y el suelo existente, se compactaría con el paso del tiempo, lo que generaría un asentamiento diferencial inducido, pero del lado contrario, logrando reducir el ángulo de inclinación de la torre.

Este procedimiento se experimentó a escala real, entre 1993-1998, en la Catedral de México, para corregir el problema del asentamiento diferencial, donde se obtuvieron resultados óptimos (Santollo y Ovando, 2008; Aguilera, 2013). Con base en las experiencias en México, para inicios de 1999 se inició el proceso de subexcavación controlado utilizando 12 taladros colocados del lado norte de la Torre de Pisa (Burland et al., 2003). En la Figura 9, se ilustra el proceso.

El proceso tardó dos años y se extendió a 41 perforaciones. Extrajeron cerca de 38m³ de suelo. Los contrapesos de plomo se fueron removiendo gradualmente, a medida que se reducía la inclinación de la torre. La inclinación se revirtió en 30", que equivale al 10% de la pendiente máxima alcanzada, volviendo a la situación en la cual se encontraba la torre hace dos siglos (Crocì, 2001), antes de la construcción del catino (Jamolkowski y Viggiani, 2007).

4. Discusión

Aunque la causa principal del asentamiento de la torre de pisa es atribuida al diseño inapropiado de la cimentación, existen un par de consideraciones a tomar en cuenta. Primero, que este diseño inapropiado no fue una negligencia, ya que fue construida en la era precientífica de la construcción. Para el año 1173, no se habían desarrollado los conocimientos —matemáticos y físico mecánicos—, que sustentan los modelos numéricos que sirven para el diseño de cimentaciones. Desde la antigüedad griega hasta el renacimiento, la ciencia de la construcción se limitaba al uso de técnicas de proporciones geométricas constructivas (Mark, 1993/2002; Coldstream, 1991, 2002; Kostof,

1977/1984). Los edificios medievales eran diseñados y construidos siguiendo reglas de proporción (Heyman, 1995/1995), con lo mismo que aseguraban la estabilidad (Coldstream, 2002; Huerta, 2001). Aún en las últimas décadas, con el desarrollo que la mecánica aplicada ha tenido, la predicción de asentamientos no es una tarea fácil (Simons y Menzies, 1975/2000), a tal nivel que se le considera un arte de la ingeniería geotécnica, porque se requiere desarrollar la habilidad de modular los parámetros necesarios en el diseño de las intervenciones (Namdar et al., 2019).

La segunda consideración es que, aún con la falta de soluciones racionales para el diseño analítico de cimentaciones en la era precientífica, para el siglo XII existían técnicas empíricas utilizadas para construir sobre suelos fangosos y lacustres que probablemente no eran conocidas localmente en Pisa al momento de la construcción de la torre. Ejemplo de esto se pueden mencionar al menos cuatro soluciones. Mark (1993/2002) ha documentado que, en construcciones de la antigua civilización griega, se utilizaron vigas apiladas de madera en los cimientos de los muros de mampostería para la construcción sobre suelos pantanosos, técnica también utilizada por los romanos. En la Edad Media, en los tiempos góticos se emplearon retículas de tabazón escalonadas (Mark, 1993/2002). Mainstone (1983/2001) comenta que la antigua civilización romana no demolía las cimentaciones para construir nuevos edificios, sino que incorporaban las nuevas cimentaciones sobre las existentes, como en el Panteón de Agripa, documentado por Ziolkowsky (2009). La tercera solución fue construir cimentaciones contiguas -de forma paralela- a los cimientos de edificios emplazados previamente, una técnica utilizada en numerosos edificios romanos. La cuarta solución es la técnica tradicional, que consiste

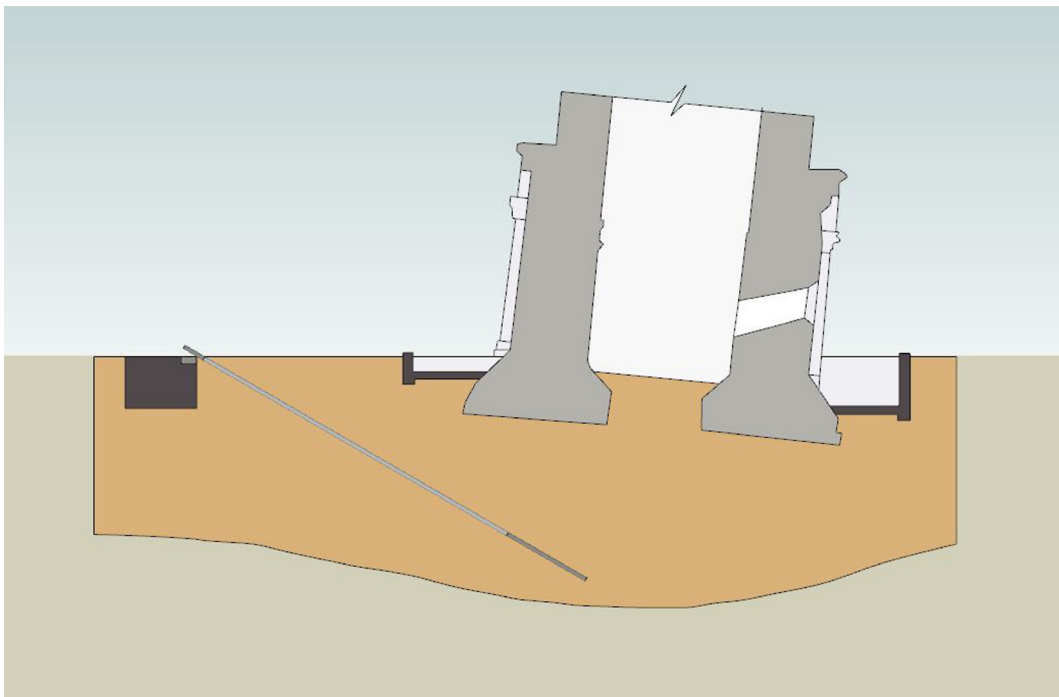


Figura 9: Método de subexcavación

Fuente: Elaboración propia (2022) con base en Terracina (1962)

en el uso de pilotes de madera. Esta es común en asentamientos lacustres y data desde tiempos neolíticos (Bahamón y Álvarez, 2009).

La adición de contrapesos fue utilizada en tres ocasiones. Su efectividad en el siglo XX está relacionada con el hecho de que fueron estudiados analíticamente para colocarlos de forma controlada, considerando la masa añadida, el momento de volteo de la torre y las características de las arcillas del subsuelo, que además emergía. Esto se contrasta con la acción pragmática de la intervención del siglo XII.

La realineación de los muros tuvo dos implicaciones. Primero, cambió la geometría volumétrica del edificio y la localización del centro de masa. Segundo, el cambio en la geometría del edificio impide que se pueda corregir por completo la inclinación. Por un lado, posee una curvatura propia que al alinearse dejaría inclinada la torre del lado contrario. Por otro lado, se generan variaciones constantes en la inclinación por estaciones climáticas y por el efecto de dilatación térmica durante el día. Probablemente, si los constructores de esa época hubiesen conocido que las propiedades del suelo del lado realineado son más compresibles, no hubiesen añadido más niveles por el riesgo de colapso que implicaba.

La conclusión de la obra con las cámaras campanario, además de haber influido en el asentamiento progresivo durante décadas, marcó un hito en la forma de la torre y en su historia. Por esa razón, aunque en la década de 1990 consideraron desmontar la cámara del campanario para ser reconstruida posteriormente en otro sitio-como ocurrió con Abú Simbel-, esta acción no se ejecutó por no estar alineada con el principio de conservación de *preservar las características históricas y artísticas del monumento*.

Las integraciones estéticas, aunque son esenciales, requieren ser evaluadas en los monumentos, porque de lo contrario se resuelve un problema formal-funcional arquitectónico (pero se genera un problema de estabilidad), y porque se requiere que se ajusten a los criterios de conservación, que son pauta para delinear la ruta de las intervenciones.

La implementación de integraciones tipificadas, tales como el reforzamiento de los cimientos e inyección de concretos en el subsuelo, o basadas en experiencias anteriores, como el congelamiento del suelo con nitrógeno, ya aplicado en el metro de Londres, no fueron soluciones efectivas.

Integraciones analíticas-experimentales monitoreadas son las que proporcionan mayor garantía, ya que proporcionan resultados previos cercanos a lo que puede ocurrir en la realidad. La sub-excavación pudo haberse implementado un siglo antes, según datos encontrados por Burland (2008), quien menciona que existen registros de extracción de suelo para enderezar la torre de la iglesia de St. Chad, en Wybundery, en 1832. Aún con el estudio de Terracina (1961, 1962), fue necesaria la experimentación a escala, para tener certeza de su efectividad.

Existen otras intervenciones realizadas para evitar el colapso, pero no ejecutadas en la cimentación. Entre estas está las integraciones de zunchos de acero en la cornisa del primer piso de la torre a inicios de los noventa (Lodigiani y Macchi, 2005), el sistema provisional de cables de seguridad previo a la sub-excavación, y otras integraciones de barras de acero inoxidable con inyección de morteros, en el primer nivel y segundo nivel, entre 1998 y 1999 (Lodigiani y Macchi, 2005).

5. Conclusiones

En el desarrollo de este artículo se mostró que, aunque existen algunos procedimientos que han tenido resultados óptimos en algunos edificios, esto no significa que siempre se tendrá garantía de su eficiencia. Como se puede observar en los resultados y discusión, las acciones no siempre funcionaron, aún aquellas medidas que aparentemente pudieron parecer como soluciones.

Por esta razón, las medidas a implementar ante la degradación de edificios patrimoniales no deben ser tomadas como procedimientos sistemáticos inmutables a seguir. La comprensión de la degradación en los edificios requiere del conocimiento y experiencia de varias disciplinas para poder identificar las causas (Watt, 1999/2007; Feilden, 1982/2003).

La historia de las intervenciones de la Torre de Pisa incluye una serie de integraciones y liberaciones: integraciones de contrapesos o masas efímeras, integraciones constructivas de niveles, integraciones de refuerzos en la mampostería, integraciones de anclajes de cimentación y extracciones de suelo. El resumen de todas estas intervenciones se presenta en la Tabla 1.

Año	Intervenciones
1185	Colocación de contrapesos sobrepuestos
1272-1278	Construcción con muros realineados
1838	Excavación y construcción del catino.
1934	Reforzamiento de la cimentación e impermeabilización del catino
1992	Integración de zunchos acero en primer nivel
1993	Integración de viga de concreto y contrapesos de plomo
1995	Congelamiento del suelo para integración de viga de concreto postensado con anclajes de acero
1998	Integración de cables tensores
1998	Subexcavación
2001	Integración de barras de acero inoxidable en mampostería

Tabla 1: Línea del tiempo de las intervenciones
Fuente: Elaboración propia (2021)

La existencia de la Torre Campanario inclinada de la Catedral de Pisa se debe solo a un número reducido de intervenciones. La sustracción de suelos para nivelar, inicialmente propuesta por Terracina (1962), ha sido la mejor solución para asentamientos diferenciales.

Debido a la magnitud de los trabajos ejecutados, es necesario identificar que los monumentos también se convierten en laboratorios de investigación de ingeniería-arquitectura, que son útiles para el desarrollo de la ciencia del ambiente construido. La experimentación en sitio controlada, con modelos a escala, puede ser una vía para tener un margen de seguridad aceptable en las intervenciones. Con casi un milenio de existencia, la Torre de Pisa ha sido un sitio de experimentación de métodos de intervención para evitar su colapso. La complejidad del problema de las intervenciones ha dado origen a nuevas estrategias de consolidación de monumentos, que actualmente son experimentadas en otros edificios en el mundo, permitiendo la generación de laboratorios de investigación de sitio⁴. Como es de esperarse este no es el único caso, por lo que queda abierta la exploración de contraejemplos de intervenciones para consolidar.

Cómo citar este artículo/How to cite this article:
Cruz-Ramírez, L. (2022). Las intervenciones en la Torre campanario de Pisa: entre integraciones y liberaciones. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 11(22), 129-141. doi: <https://doi.org/10.18537/est.v011.n022.a11>

6. Referencias bibliográficas

- Aguilera Jiménez, P. (2013). *Catedral de México: Hundimiento y rescate*. Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México. <http://www.iingen.unam.mx/es-mx/Publicaciones/Libros/Documents/LibroCatedral.pdf>
- Alex. (2021). Torre de Pisa. *3D Warehouse*. <https://3dwarehouse.sketchup.com/model/ed77d3545d89c709c6acc5812eb57adf/Torre-de-Pisa>.
- Ascani, V. (2014). *The Leaning Tower of Pisa. Concept and Realisation of a Medieval Masterpiece*. Edizioni ETS.
- Atkinson, M. F. (2003). *Structural foundation manual for low-rise building*. Spon press.
- Bahamón, A., y Álvarez, A. M. (2009). *Palafitos: de arquitectura vernácula a contemporánea*. Parramón
- Bajaj, R., y Choudhary, S. (2014). Outstanding Structure: The Leaning Tower of Pisa. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 1(5), 80-83. <http://www.krishisanskriti.org/jceet.html>
- Broto, C. (2006). *Enciclopedia Broto de patologías de la construcción*. Gustavo Gili.
- Burland, J. B. (2008). Stabilising the Leaning Tower of Pisa: The Evolution of Geotechnical Solutions. *Transactions of the Newcomen Society*, 78(2), 175-205. <http://dx.doi.org/10.1179/175035208X317657>
- Burland, J. B. (2014). The Stabilization of the Leaning Tower of Pisa. *Journal of Architectural Conservation*, 8(3), 7-23. <https://doi.org/10.1080/13556207.2002.10785324>
- Burland, J. B., Jamiolowki, M., y Viggiani, C. (2003). The stabilisation of the leaning tower of Pisa. *Soils and Foundations*, 43(5), 63-80. https://doi.org/10.3208/sandf.43.5_63
- Calabresi, G., y Carlo, C. G. (1991). Le attuali condizioni di stabilità della Torre di Pisa. *Materiali e strutture*, 1, 3-11.
- Caldelli, V., y Meucci, G. (2005/2010). *La Torre Pendente. il restauro del secolo*. Pacini Editore.
- Castex, J. (2008). *Architecture of Italy*. Greenwood Press.
- Coldstream, N. (1991). *Mason and Sculptors*. University of Toronto Press.
- Coldstream, N. (2002). *Medieval Architecture*. Oxford University Press.
- Costa, A., Miranda Guedes, J. y Varum, H (Eds.). (2014). *Structural Rehabilitation of Old Buildings*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-39686-1>
- Costa, A., Arède, A. y Varum, H. (Eds.). (2018). *Case Studies of Building Pathology in Cultural Heritage*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5858-5>

⁴ Tal como ha ocurrido en el Coliseo Romano, el Foro Romano y la Vía Sacra, el Panteón de Agripas, las ciudades de Herculano y Pompeya, El Partenón en la Acrópolis, Santa Sofía en Estambul y la Catedral de la Ciudad de México.

- Croce, P. (2021). New frontiers of Composites Applications in Heritage Building: Repair of exposed Masonry of St. Nicola Church in Pisa. *Journal of Composites Science*, 5(218). <https://doi.org/10.3390/jcs5080218>
- Croci, G. (2001). Las torres y su asentamiento: Los casos de la torre de pisa y las torres de Angkor. *Loggia* (11), 86-96. <https://doi.org/10.4995/loggia.2001.5233>
- Croci, G. (2012). *Conservazione e restauro strutturale dei beni architettonici*. CittàStudi.
- D'Altri, A.M., Milani, G., de Miranda, S., Castellazzi, G., y Sarhosis, V. (2018). Stability analysis of leaning historic masonry structures. *Automation in Construction*, 92, 199-213. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.003>
- Das, B. M. (1999). *Shallow Foundations: Bearing Capacity and Settlement*. CRC PRESS.
- Delgado, J.M.P.Q (Ed.). (2016). *New Approaches to Building Pathology and Durability*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-0648-7>
- Delgado, J.M.P.Q (Ed.). (2021). *Case Studies in Building Rehabilitation*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-49202-1>
- Delgado, J.M.P.Q (Ed.). (2022). *Masonry: Building Pathologies and Design*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-80496-1_1
- Federal Emergency Management Agency [FEMA]. (2006). *Techniques for the Seismic Rehabilitation of existing building*. Federal Emergency Management Agency (FEMA).
- Feilden, B. M. (1982/2003). Multi-disciplinary collaboration project in the UK. En *Conservation of Historic Building* (pp. 189-202). Architectural Press.
- Fletcher, B. (1905/1996). *A History of Architecture on the Comparative Method*. Bradbury Agnew & Co. Ld.
- Fiorentino, G., Nuti, C., Squeglia, N., Lavorato, D., y Stacul, S. (2018). One-Dimensional Nonlinear Seismic Response Analysis Using Strength-Controlled Constitutive Models: The Case of the Leaning Tower of Pisa's Subsoil. *Geosciences*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/geosciences8070228>
- Geng, J., Meng, Z.P., Yin, B.X., y Zhu, L.F. (2020) Simulation on Sequential Construction Process and Structure of the Pisa Tower. *Journal of Building Construction and Planning Research*, 8, 30-41. <https://doi.org/10.4236/jbcprt.2020.81003>
- Hamma-Adama, M., Iheukwumere, O., y Kouider, T. (2020). Analysis of Causes of Building Collapse: System Thinking Approach. *Jordan Journal of Civil engineering*, 14(02), 188-197. <https://jjce.just.edu.jo/issues/paper.php?p=4936.pdf>
- Heyman, J. (1997). *The Stone of Skeleton: Structural Engineering of Masonry Architecture*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107050310>
- Heyman, J. (1995/1999). *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera.
- International Council of Monuments and Sites. (1964). *Carta de Venecia*. UNESCO.
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., y Pepe, C. (1993). Leaning Tower of Pisa: Updated Information. *Proceeding: Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering* (pp. 1319-1330). Missouri University of Science and Technology. <https://scholarsmine.mst.edu/icchge/3icchge/3icchge-session15/5>
- Jamiolkowski, M., y Viggiani, C. (2007). *The restoration of the Leaning Tower of Pisa*. Pacini Editore.
- Karimi, Z., Dashti, S., Bullock, Z., Porter, K., y Liel, A. (2018). Key predictors of structure settlement on liquefiable ground: A numerical parametric study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 113, 286-308. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.03.001>
- Kouris, E. G., Kouris, L. A. S., Konstantinidis, A. A., Karayannis, C. G., y Aifantis, E. C. (2021). *Assessment and fragility of Byzantine unreinforced masonry towers*. *Infrastructures*, 6(3), 40. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6030040>
- Lodigiani, A., y Macchi, G. (2005). Technologies for the prestressing rings of the Leaning Tower of Pisa. *Structural Analysis of Historical Constructions* (pp. 771-779). Taylor & Francis Group.
- Mainstone, R. (1983/2001). Support, walls and foundations. En R. Mainstone, *Development in Structural Form* (pp. 175-191). Routledge.
- Marchi, M. (2008). *Stability and strength analysis of leaning towers* [Disertación doctoral, University of Padova]. https://www.repository.unipr.it/bitstream/1889/958/1/MarchiM_PhDThesis.pdf
- Mark, R. (1993/2002). *Tecnología arquitectónica hasta la revolución científica. Arte estructura de las grandes construcciones*. Akal.
- Michiels, T. L. (2015). Seismic Retrofitting Techniques for Historic Adobe Buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(8), 1059-1068. <https://doi.org/10.1080/15583058.2014.924604>
- Naghbi, F. y Fenton, G. A. (2021). Design of foundations against differential settlement. *Canadian Geotechnical Journal*, e-Firest, 1-13. <https://doi.org/10.1139/cgj-2020-0782>
- Namdar, A., Dong, Y., y Deyu, Y. (2019). The Effect of Concrete Footing Shape in Differential Settlement: A Seismic Design. *Advances in Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2019/9747896>
- Olanrewaju, A., Han Tee, S., Im Lim, P., y Fang Wong, W. (2022). Defect management of hospital buildings. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 7(18). <https://doi.org/10.1007/s41024-021-00159-6>

Ronzani, M., y Ascani, V. (2011). *La torre pendente. Storia e interpretazione del campanile del Duomo di Pisa* (Mirabilia pisana). Edizione ETS.

Sánchez Lavín, J. R., Escolano Sánchez, F. y Mazariegos de la Serna, A. (2018). Chemical Injections realized with null pressure for underpinning the foundation of an 18th century building located in the historical city of Cuenca (Spain). *Applied Sciences*, 8 (7). <https://doi.org/10.3390/app8071117>

Santollo Villa, E., y Ovando Shelley, E. (2008). *Catedral y Sagrario de la Ciudad de México*. TGC Geotécnia.

Simons, N., y Menzies, B. (1975/2001). *A short course in foundation engineering*. Thomas Telford.

Solà-Morales, I. (2006). *Intervenciones*. Gustavo Gili.

Squeglia, N., y Bentivoglio, G. (2014). Role of Monitoring in Historical Building Restoration: The Case of Leaning Tower of Pisa. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(1), 338-347. <http://dx.doi.org/10.1080/15583058.2013.865813>

Terracina, F. (1961). La torre de Pisa. Le vicende del terreno sottostante e una via per stabilizzare il monumento. *L'ingegnere*.

Terracina, F. (1962). Foundations of the tower of Pisa. *Géotechnique*, 12(4), 336-339. <https://doi.org/10.1680/geot.1962.12.4.336>

UNESCO. (1964). *International Charter for the conservation and restoration of monuments and sites*. https://www.icomos.org/charters/venice_e.pdf

UNESCO. (2021). *Piazza del Duomo, Pisa*. <https://whc.unesco.org/en/list/395/>

Watt, D. (1999/2007). *Building pathology. Principles and practice*. Blackwell Publishing.

Wu, Y., Gao, Y., Zhang, L. y Jun Yang, J. (2019). How distribution characteristics of a soil property affect probabilistic foundation settlement — from the aspect of the first four statistical moments. *Canadian Geotechnical Journal*, 57(4), 595 - 607. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0089>

Ziolkowsky, A. (2006). What did Agrippa's Pantheon Look like? New Answers to an Old Question. En G. Graßhoff, M. Heinzelmann, y M. Wäfler (Ed.), *The Pantheon in Rome: contributions to the conference, Bern*, (pp. 29-39). Universität Bern, Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte.