

# Análisis de la inestabilidad estructural del edificio central del Castillo de los Tres Reyes del Morro en La Habana

## Analysis of the structural instability of the central building of the Castillo de Los Tres Reyes del Morro in Havana

Paradiso, Michele

Arquitecto, Profesor del Departamento de Arquitectura DiDA, Sección Construcciones, Universidad de Florencia, michele.paradiso@unifi.it

Useli, Gianluca

Licenciado en Arquitectura por la Universidad de Florencia, Arquitecto, uselig@libero.it

### Resumen

La ponencia trata el tema de la situación estructural del Castillo del Morro de La Habana, proyectado en el siglo XVI por los ingenieros italianos Antonelli. El castillo, hoy en día, presenta un conjunto de grietas bastante avanzadas, que causan seria preocupación sobre el tema de futura inestabilidad. La investigación se concentra en las bóvedas que se encuentran en el edificio central. El estudio, desarrollado a través investigaciones en archivos históricos, levantamientos geométrico y morfológico, análisis numérico con apropiados códigos de cálculo, propone demostrar que la causa es debida a una intervención posterior hecha “no a regla de arte”. El estudio estructural, no particularmente enfrentado hasta el momento, ofrece la oportunidad de conocimiento acerca del monumento y de pensar en medidas correctas de protección en el futuro.

### Abstract

The document deals the question about the structural situation of the Castillo del Morro de la Habana, originally designed by the Italian engineers Antonelli in the XVI century. The castle currently presents a series of advanced cracks, causing serious concern about the issue of future instability. The research has been concentrated specifically on masonry vaults located in the central building. The study, developed through research in historical archives, geometric and morphological surveys, numerical analysis with appropriate calculation codes, proposes to demonstrate that the cause of these cracks is due to a posterior intervention executed “not to a fine art”. The structural study, not particularly accomplished up to present, offers the opportunity of knowledge about the monument and to think on correct protective measures in the future.

**Palabras clave:** *Morro; Habana; estática; estructura; bóveda; conservación.*

**Keywords:** *Morro; Havana; statics; structure; vault; conservation.*

## **1. Introducción**

El Castillo de los Tres Reyes del Morro representa, aun hoy en día uno de los símbolos mayormente reconocidos por la población de la ciudad de La Habana. Para los cubanos el Morro es la imponente fortaleza que con su faro, visible desde cada punto de la ciudad y en particular desde el frecuentadísimo Malecón, preside el canal de acceso a la gran bahía del puerto. Ejecutado entre finales del siglo XVI y la primera mitad del siglo XVII por orden de la Corona Española, forma parte del complejo sistema de fortificaciones de la entonces importante colonia. Encargado al ilustre ingeniero militar de origen italiano - Gatteo, Emilia Romagna - Battista Antonelli, uno de los seis exponentes de la familia de ingenieros que se dedicaron por casi un siglo al servicio de España y se hicieron protagonistas de un número impresionante de obras militares, que incluyen fortalezas, murallas, navegación de ríos, puentes, acueductos hasta enteros planes urbanos. Su campo de acción era increíble, si pensamos en la época en que desarrollaron su trabajo: España, África del Norte, América Central, de Veracruz a Panamá, de Cuba a Cartagena de Indias, hasta las costas venezolanas y brasileñas. No fueron ellos solamente, pero es significativo el hecho que Battista fue encargado directamente por el Rey Felipe II, a finales del siglo XVI, del proyecto general del sistema de fortificaciones de toda el área del Caribe. El castillo del Morro de La Habana, según la mayoría de los historiadores y estudiosos internacionales, constituye la obra de mayor relevancia de Battista Antonelli, representativa del modelo de arquitectura militar considerada “traza moderna” o “traza italiana”, que tiene sus orígenes durante la primera mitad del siglo XVI con los padres fundadores, el sienés Francesco di Giorgio Martini y los florentinos Giuliano y Antonio da Sangallo.

## **2. La fortaleza en la historia**

### **2.1 Las fases constructivas del castillo**

La construcción del castillo del Morro fue iniciada bajo la dirección de Baptista Antonelli y Juan de Tejeda el 20 de septiembre de 1589 como expresa la preciosa inscripción sobre la piedra en las cercanías de la plataforma de la Estrella. La función militar de la fortaleza era la de proteger la ciudad y las numerosas flotas españolas cargadas de mercancías que transitaban dentro de la gran bahía, desde los orígenes como puerto natural, de las repetidas y amenazadoras incursiones de corsarios financiadas por los gobiernos inglés y francés. La embocadura del canal de acceso al puerto representaba el real punto estratégico de defensa, y Antonelli fue el primero en proyectar en la ciudad un sistema de fortificaciones de una considerable magnitud: el castillo del Morro sobre el promontorio de la ribera norte y el castillo de San Salvador de la Punta sobre la ribera opuesta. Las dos fortalezas eran funcionales conjuntamente, enlazadas por una cadena que regulaba el tráfico portuario y, en caso de necesidad, aseguraban el fuego cruzado contra los navíos enemigos.

Battista Antonelli creó para el Morro, un edificio ejecutado con la piedra caliza que se podía extraer de las vecinas canteras de la Cabaña, y por la naturaleza escarpada del terreno, el complejo se sitúa con cotas decrecientes hacia el mar con una planta constituida por un polígono irregular que se desarrollaba para defender tres líneas de ataque: el frente de tierra, el frente de mar y el frente del canal del puerto. La técnica constructiva adoptada para la ejecución de los frentes defensivos fue la de terraplén, aunque para gran parte de ellos fue pensada para contener las abovedas utilizadas como alojamiento, polvorines y casamatas. A este, el frente de tierra resulta el más regular, donde son reconocibles los detalles de la arquitectura renacentista italiana, constituidos por la cortina de conexión de los dos bastiones laterales, el foso, la contraescarpa, el

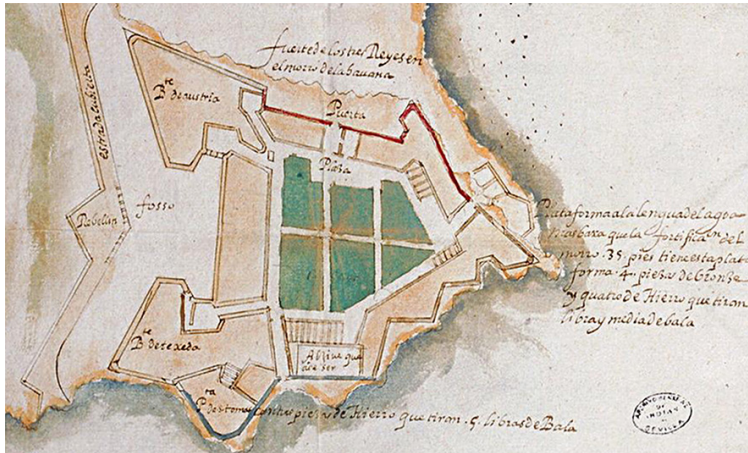


Figura 1. Extracto del plano por Battista Antonelli (5 marzo 1593) donde muestra la planta original del Castillo del Morro. (desde “Planta de la fortificación del Morro y Punta de la Habana”, Archivo General de Indias, Mapas y Planos Santo Domingo, n.13)

camino cubierto con el rediente, y el glacis.

Los dos bastiones están provistos de orejones - con los flancos entrantes - donde se ejecutaron, en el interior, las casamatas para la protección de la cortina y del foso. Los baluartes tenían el nombre de Tejedada - en realidad un medio baluarte - y de Austria. El foso profundo fue pensado para permanecer seco. A noroeste, el frente de mar está caracterizado por una cortina mural con perfil

irregular, que forma en planta una línea quebrada con tres vértices hacia el mar. El trazado mural unía la punta del Morrillo y su torre de observación con las baterías de San Nicolás y la de Santo Tomás que se destacaba sobre el medio baluarte de Tejedada. El acceso principal a la fortaleza se abre a suroeste en el frente del canal del puerto y frente al castillo de la Punta. Esta línea defensiva está formada por la cara sur del baluarte de Austria, la cortina de la entrada principal que se concluye en el baluartillo de Santiago, y al final termina en la punta del Morrillo; bajo esta última se encuentra la Plataforma de la Estrella. El castillo debía estar dotado por lo menos de tres aljibes de agua, presencia fundamental para la supervivencia de la tropa durante los asedios. Todos los elementos de la fortaleza eran puestos en comunicación entre ellos según una distribución de enlaces, escaleras, rampas y surtidas hacia el exterior. El interior de la fortaleza era un espacio concebido para ser ocupado por una suerte de ciudadela, constituida por algunas edificaciones dotadas de estructuras provisionales y destinadas al alojamiento de la tropa y del comandante, una iglesia y algunos almacenes. La verdadera y propia plaza de armas, lugar necesario para reunir a la tropa, se encontraba entre la cortina de la entrada principal y la misma ciudadela. En todo el entorno del complejo de edificios se desarrollaban el camino de ronda y las dos rampas que conducían a la plataforma alta del castillo. La construcción del Castillo del Morro se extendió por largo tiempo, existe la certeza que fue concluido en 1640: de este año por un siglo más representó ser una de las fortalezas más importantes a otro lado del océano, asegurando el carácter inexpugnable de La Habana. A causa de la implicación de España en la Guerra de los Siete Años, La Habana fue atacada por los ingleses en junio de 1762 y conquistada poco tiempo después tras la toma del Castillo del Morro. Durante el asedio, la fortaleza, si bien el cuerpo principal se mantuvo íntegro, sufrió alguna destrucción por efecto de las minas, principalmente a norte, sobre los frentes de tierra y de mar, en la cortina, el baluarte de Tejedada y la batería de San Nicolás.

Cuando la ciudad fue restituida a los españoles, el nuevo gobierno dio inicio a la renovación y la reedificación de las obras del sistema defensivo de la ciudad, encargado el ingeniero español Silvestre Abarca. Entre las varias obras propuestas, fueron de una parte la decisión de ejecutar el imponente complejo fortificado de San Carlos de la Cabaña (1763-1774) sobre la colina homónima, en la vecindad del Morro, que le dará la primera importancia en la defensa de la ciudad. Se decidió reorganizar también las fortalezas existentes, incluido el Morro, confirmándole la importancia estratégica, no obstante las limitaciones aparecidas con la evolución de la técnica militar. En un breve período de tiempo (1764-1771), fueron reconstruidas las partes destruidas del castillo, dotándolas de

mayor solidez y mejorando la funcionalidad del edificio con la introducción de nuevos elementos, como por ejemplo el edificio central, las nuevas rampas, la batería de Santo Tomás, el túnel aspillerado con el camino cubierto que lo enlazaba con el nuevo fuerte de la Cabaña, la profundización del foso, la reconstrucción de la antigua torre, etcétera.

## 2.2 La historia reciente

Durante los siglos sucesivos la fortaleza se mantuvo con nueva conformación del setecientos, no muy distante de la original, al menos hasta cuando se mantuvo en el campo de la defensa militar. Con la cercanía de la guerra hispano-norteamericana en Cuba (fines del siglo XIX) se construyó la Batería de Velasco para reforzar al norte el frente de mar y además una serie de obras menores de adecuación, como el emplazamiento de polvorines y nuevos cañones modernos. Siempre en el XIX se potenció su función de estación del tráfico marítimo con la reconstrucción completa (1844-45) del faro y de la puesta en función de la primera estación semafórica (1888), posteriormente reconstruida (1926). Concluido el último enfrentamiento militar, los espacios del castillo albergaron, primero, la Escuela de Cadetes del Ejército (1911-45) y después con la llegada del movimiento revolucionario, la prisión (1967). En 1977 se decidió transferir esta última de los locales del Morro, concentrándola toda en la Fortaleza de San Carlos de la Cabaña. Eusebio Leal Spengler, Historiador de la Ciudad de La Habana, propuso al Morro como lugar para celebrar el XI Festival Mundial de la Juventud y los Estudiantes del año siguiente, lo que permitiría así, por la primera vez la apertura del espacio al público autorizando el cese de sus funciones militares y paramilitares.

El Ministerio de las Fuerzas Armadas de Cuba (MINFAR) adjudicó a una empresa turístico-gastronómica local la gestión de la actividad comercial llevaban a cabo en el interior. Con el financiamiento obtenido del Festival de la Juventud, se emprendió una serie de intervenciones para la recalificación del lugar que fueron inicialmente encargadas a una empresa estatal externa, la Empresa Nacional de Obras de Arquitectura (ENPOA);



Esta se ocupó, en 1982, del levantamiento del complejo. El mismo representa un año fundamental para la ciudad y sus monumentos, incluido el Castillo del Morro, porque fue declarada Patrimonio Mundial de la Humanidad por la UNESCO. Desde ese momento las organizaciones internacionales enviaron numerosos fondos para restaurar el Centro Histórico de La Habana y las obras militares de valor. La Oficina del Historiador de la Ciudad (OHC), dirigida por Eusebio Leal, sustituyó a la ENPOA, de la que heredó la documentación realizada y sobre la base de esta elaboró un programa de restauración del castillo, realizado entre los años 1987 y

Figura 2. Los elementos y espacios principales del Castillo, que se conservan hoy en día.

1993. En 1992 se constituyó la entidad territorial de Parque del Complejo Histórico Militar Morro-Cabaña (PCHMC), nacido de la idea del proyecto de recuperar los complejos fortificados y sistematizar una amplia área a su alrededor. Después de concluidos los trabajos de restauración en 1993 fue reabierto al público albergando regularmente las importantes manifestaciones culturales de la Feria Internacional del Libro, en febrero y la Bienal Internacional de Arte, en mayo. En tales ocasiones el MINFAR se hace cargo también de la gestión de los espacios mediante un órgano administrativo interno bajo el mando del Complejo de los Museos Histórico-Militares (CMHM), finalizando de esta manera el aporte de la OHC. En los inicios del año 2000, el CMHM decide invertir para realizar una nueva restauración de las dos fortalezas con un programa más amplio. Se constituyó dentro del Complejo una oficina técnica y dando prioridad al área de la Cabaña, los trabajos se iniciaron en 2007 y al año siguiente también en el Morro. Actualmente continúan los trabajos de restauración, aunque el complejo se mantiene abierto al público para visitarlo.

El Castillo de los Tres Reyes del Morro representa aun hoy uno de los símbolos más conocidos de La Habana. Su imagen, sobre todo a la puesta del sol, es muy sugestiva: la estación semafórica con su faro, desarrolla la tarea estratégica de controlar todo el tráfico



Figura 3. Ubicación del Castillo de los Tres Reyes del Morro en la ciudad de La Habana.

marítimo dentro y fuera del puerto. Desde lo alto de su mole, es posible individualizar todas las zonas en que está dividida la ciudad. Además pone a disposición algunos de sus numerosos espacios para montar exposiciones con temas artísticos y culturales.

El acceso principal al complejo se logra por el Túnel de la bahía, sólo vehicular, que corre bajo el canal y que une las dos orillas de la bahía. Para

los visitantes ese trayecto generalmente es cubierto por medio de servicios de taxi u ómnibus turísticos que confieren al Morro ser la primera etapa para enlazar los balnearios de la costa este. La célebre “lanchita”, embarcación que aun hoy atraviesa la bahía y enlaza diariamente La Habana Vieja con la orilla opuesta, permite arribar al pueblo de Casablanca, desde el cual se puede después llegar al Morro en un paseo a pie.

### 3. Estado de conservación

El complejo se conserva globalmente íntegro, aunque el estado de degradación ambiental, material y estructural presenta algunos casos de emergencia de mucho cuidado. Las intervenciones de restauración ejecutadas a fines del siglo pasado, implicando toda el área del Parque Histórico Militar, sustancialmente han permitido hacer lo suficientemente factible para la visita del público. Desdichadamente los trabajos de restauración no fueron seguidos y unido a la falta de fondos para el mantenimiento, la situación no tuvo mejoría. Solo recientemente, desde 2008, el CMHM ha retomado los trabajos de restauración, lo mismo en la Cabaña que en el Morro, logrando intervenir con sólo operaciones puntuales dirigidas a algunos espacios, sin una planificación general de los trabajos a ejecutar. Los

espacios del castillo sufren fuertemente la presencia de humedad con alta concentración salina, la que agrede la superficie y los materiales provocando diversos fenómenos de erosión de los muros de piedra, formación de pátina biológica, disgregaciones y separación de los estratos superficiales, tales como el revoque. En muchas áreas interiores, las menos ventiladas, se verifica la formación de concreciones salinas en forma de estalactitas y estalagmitas. Los fenómenos erosivos son acentuados después por la alta exposición al viento y las marejadas producto de los ciclones, que arrojan las olas con violencia sobre la cortina exterior hasta penetrar en el interior del complejo. Basta pensar en las condiciones en que se expresan las inscripciones que atestiguan la colocación de la primera piedra, entre las más antiguas de la isla: se encuentran en un estado de absoluto peligro para su conservación en el tiempo con el agua de mar que está erosionando poco a poco el relieve, sobre todo en la parte derecha, donde resulta ya comprometida en muchas de sus partes. En los últimos años las condiciones han estado empeorando velozmente y aún no se ha puesto remedio a ese problema. A esta situación se añade la falta de mantenimiento y las medidas de seguridad de los espacios, verificándose frecuentemente la presencia de instalaciones y cables descubiertos y la ausencia de protecciones adecuadas para los visitantes, además de una escasa valoración del monumento y de los espacios a partir de la carencia de los enlaces con la ciudad. Desde un punto de vista estático, las emergencias que merecen absoluta atención con respecto a la base rocosa de la escollera sobre la cual se apoya el castillo, que presenta una serie de fracturas a lo largo de casi todo el perímetro, como demuestra un estudio geológico realizado en 1989 al que todavía no ha seguido un proyecto de consolidación ni de intervenciones específicas. Una de estas fisuras, al lado de la Batería de la Estrella y bajo la punta del Morrillo, presenta una apertura de aproximadamente un metro, que remonta y se interrumpe antes del comienzo de las paredes de la fortaleza, la que por el momento no presenta riesgos visibles. Aún la profundidad de la grieta unida a la acción disgregante del mar pueden conducir a graves problemas de estabilidad del complejo edificado. Otra preocupación está representada por las condiciones de la garita situada en el vértice del baluartillo de Santiago, la única del



Figura 4. Algunos actuales casos de emergencia de degradación: (desde arriba izquierda) erosión del mortero y de la piedra, humedad en los espacios interiores, la fractura en la base rocosa, las lesiones en el parapeto que enlaza la estructura de la garita y al final la erosión que está dañando la antigua inscripción.

complejo que se conserva original desde las reconstrucciones del siglo XVIII, resistiendo hasta el momento, a daños o hundimiento, a diferencia de las otras tres del complejo. La estructura del muro del elemento presenta lesiones en correspondencia con las conexiones con el parapeto: se nota que la fisura es pasante, del interior al exterior en el lado de la entrada, pero resulta de importante consideración también en el otro lado mientras que el acceso a la base de la garita no presenta riesgos particulares. Esta situación pone en serio peligro la estructura en su parte superior, constituida por las paredes perimetrales y la cúpula, aunque sólidamente conectada a la base, está privada o por lo menos limitada de las necesarias conexiones horizontales que le asegurarían un vínculo adecuado al parapeto. Esta situación puede conducir

a la formación de una charnela estática ideal a la base de ataque que, bajo la acción del peso propio del volumen en voladizo y también las acciones horizontales del viento y la lluvia, que generan en el propio elemento el efecto de vuelco que lo conduciría al hundimiento. La situación requiere una intervención inmediata para salvaguardar un precioso elemento de la fortaleza, único en su tipología para ser conservado en su carácter original y además para evitar lesiones graves a las personas. Finalmente, es objeto de este estudio la presencia de lesiones en las bóvedas de barril, en ladrillos de las galerías del edificio central, que despiertan preocupación por su entidad y por el hecho que hasta ahora no habían sido analizadas con la debida atención.



Figura 5. La fachada principal del Edificio central y la plaza de armas.

#### 4. Las lesiones en las bóvedas del Edificio Central

##### 4.1 El Edificio Central

El edificio central, que surge en el interior del complejo con una estructura maciza y monolítica de la misma piedra caliza, representa una de las transformaciones mayormente perceptibles entre las operaciones de reconstrucción tras la toma de la ciudad por parte de los ingleses. El cuerpo del edificio está constituido por dos volúmenes adosados entre ellos y de dimensiones diversas. El mayor es de forma casi cuadrada de aproximadamente 47 metros de lado, mientras el menor, que albergaba las habitaciones del comandante, tiene forma de “L” inscrita en un rectángulo de 16 por 23 metros. Ambos se desarrollan en dos niveles además de una planta en semisótano y la azotea practicable. El edificio presenta una discreta regularidad en las características de distribución y construcción. El volumen mayor alberga en su interior doce galerías, seis por planta enlazadas por dos escaleras situadas en las dos extremidades opuestas del edificio, en el lado sur. Los accesos a las galerías de la planta baja se producen en el frente principal sobre la plaza de armas. Las galerías tienen forma larga y estrecha, con desarrollo de sur a norte. Los locales están enlazados por tres aperturas situadas en intervalos regulares, en los extremos y al centro de

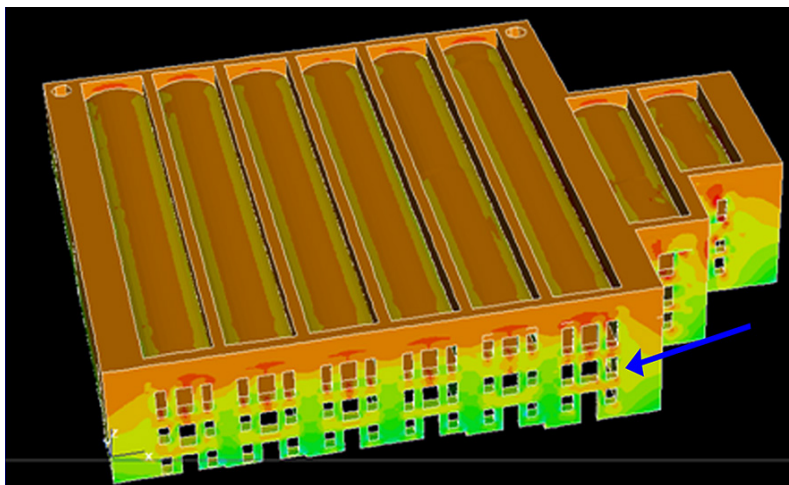


Figura 6. Visualización gráfica del resultado (tensiones normales verticales) del análisis estático lineal ejecutado con software FEM sobre el modelo tridimensional del edificio. La flecha indica el nivel donde se evidencian las lesiones en las bóvedas.

las paredes divisorias. Las cubiertas tienen forma de bóveda de barril rebajada, construidas con ladrillos. Las paredes verticales son de bloques de piedra caliza de dimensiones variables. La iluminación y la ventilación están aseguradas por grupos de tres aberturas en los extremos de cada galería. Por otra parte en la planta superior hay lucernarios que integran el sistema de ventilación y de iluminación. Los locales

semisoterrados, con techo de madera, son accesibles por el lado opuesto, al norte. La parte del edificio que albergaba la residencia del comandante tiene acceso, sea por medio de una escalera que enlaza todas las plantas, situada en el ángulo suroeste, o por las galerías adyacentes del volumen mayor. La amplia azotea tiene fuertes pendientes para asegurar el drenaje del agua de lluvia y está enlazada con el interior del edificio por dos escaleras de caracol, ubicadas en correspondencia con los otros enlaces verticales, que parten de la primera planta y obtenidos dentro del amplio espesor de las paredes exteriores este y oeste, porque de una mampostería de dos paramentos enripiada en el interior de tierra.

## 4.2 Análisis de las lesiones

Las galerías, en las que se ha hecho levantamiento de la existencia de las lesiones en el intradós de la bóveda, se encuentran en la planta baja del cuerpo principal y precisamente, de oeste a este: la primera por la mitad, la segunda, la tercera y la quinta; también la cuarta muy probablemente está recorrida por una lesión análoga pero, estando revocada con un revoque de grueso espesor y ser el espacio utilizado actualmente como sala de exposiciones, no ha sido posible verificar la presencia efectiva haciendo la inspección necesaria descubriendo la construcción en ladrillos: aún se notan marcas en relieve sobre la superficie revocada, que dejan suponer la presencia, dada su posición y la andadura similar a los presentados en las lesiones de las galerías adyacentes. La sexta y última galería de la planta baja está también revocada sin embargo, a diferencia de la cuarta, sobre la superficie no se observan ni siquiera marcas de un eventual paso suyo. Todas las fracturas que cortan transversalmente las galerías, paralelas al trazado de la bóveda, están localizadas en correspondencia con las aberturas excavadas en las paredes comunes en la zona próxima al frente norte. En las galerías en las que la restauración en curso ha sido completada, las fracturas han sido estucadas con mortero, entonces sólo se pudo valorar la andadura. Al contrario ha sido posible medir la profundidad de las lesiones de la segunda y tercera galerías, arrojando respectivamente profundidad máxima de 6 a 25 centímetros y de 14 a 25 centímetros. El ancho de las lesiones es variable, alcanzando en algunos puntos el valor máximo de 5 centímetros. El resto de la estructura del edificio se encuentra en aparente buen estado y no muestra otras señales que permitan pensar en un riesgo

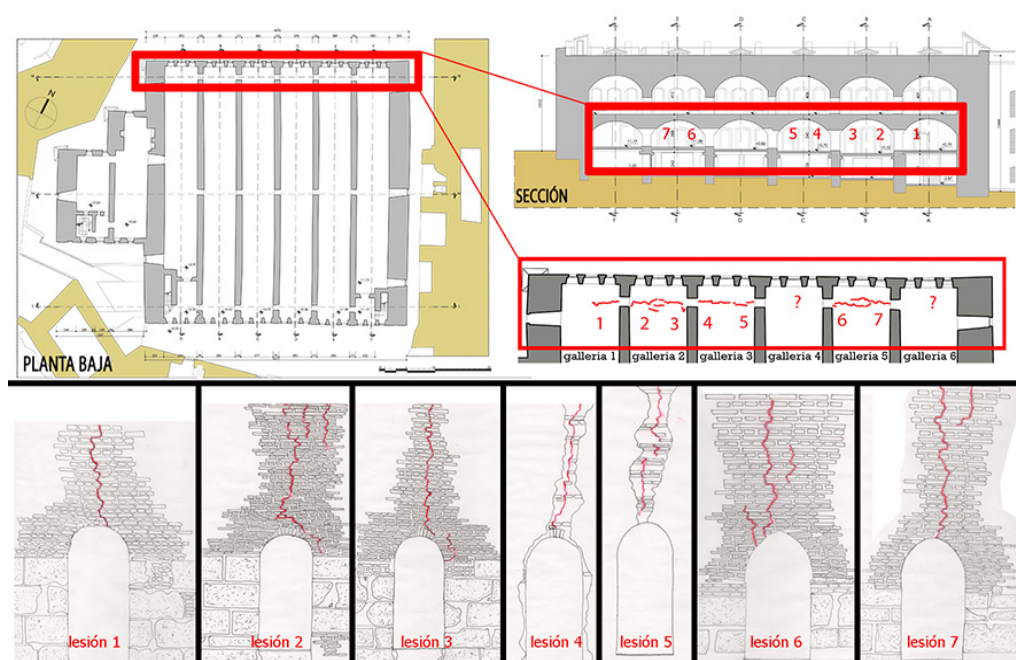


Figura 7. Localización, en planta y sección, de las lesiones en las bóvedas y cuadro de fisuras.

estático ulterior de cualquier modo relacionado con lo evidenciado en las bóvedas. En general el análisis del cuadro de fisuras del edificio depende de acciones externas - cargas, corrimientos, sismo - incompatibles con las prestaciones de los materiales, que han inducido solicitaciones a la estructura de albañilería. En el caso de la albañilería, una línea de fractura es una línea isostática de compresión, en la que, ortogonalmente a ella, se encuentra la dirección de las tracciones que ha producido la fractura. El procedimiento seguido en el caso en estudio es exactamente inverso: el objetivo es el de comprender cuáles son las causas que han producido las lesiones a través de la “lectura” de las propias lesiones sobre la estructura. Las lesiones que son objeto de estudio son las presentes en la bóveda de la galería sobre el arco del paso de la derecha (lesión 3) que se injerta como un luneto en la bóveda de barril de la cubierta. Por su conformación se trata de un arco en ménsula o falso arco, ya que está dotado de una estructura no completamente autoportante. En general, en el arco clásico el polígono funicular que garantiza el equilibrio es el interno al perfil del propio arco. En cada sección el esfuerzo normal es elevado mientras el esfuerzo cortante, responsable del deslizamiento es mínimo; por otra parte la fuerza de fricción proporcional al esfuerzo normal, es suficientemente alta impidiendo el deslizamiento. En el falso arco, de hecho, las juntas de mortero son horizontales y no radiales como en el arco “verdadero” y esto crea un problema de estabilidad, ligado al fenómeno del corte-deslizamiento. Al contrario del arco verdadero, la fuerza cortante es más o menos análoga a la del esfuerzo normal, por tanto suficientemente alta para que se verifique el peligro de deslizamiento. En este caso no toda la estructura del arco trabaja a compresión. Las ménsulas necesitan de un notable engrosamiento de las paredes y de la imposta, para contrarrestar los efectos de la gravedad, que tiende a comprimir cada lado del arco hacia el interior, produciendo el deslizamiento horizontal de los elementos. A los fines de un cálculo numérico para el estudio de la estructura de albañilería, la modelación relativa puede ser afrontada de manera diferente: modelo de estructura continua, modelo discreto o con procedimiento de homogenización. En el caso en estudio se ha considerado más correcto realizar un modelo discreto, distinguiendo los componentes de la estructura de albañilería. Tal modelo prevé un grupo de elementos rígidos - ladrillos y piedras - unidos entre ellos mediante vínculos - juntas de mortero - elásticamente deformables cuando son comprimidos. Por hecho existe una significativa diferencia entre los módulos de elasticidad del mortero y los de los elementos. También las juntas han sido modeladas en forma discreta, mediante una serie de bielas ortogonales en la interfase para transmitir el esfuerzo normal de compresión, por otra parte, una biela tangencial para transmitir el esfuerzo cortante. La característica peculiar de ese modelo es la de considerar los materiales sólidos de albañilería como un sistema rígido de elasticidad concentrada.



Figura 8. Las lesiones (lesión 3 - bóveda 2) que son objeto de estudio y la conformación del falso arco del pasaje.

Por tal razón refleja en modo real el comportamiento de la lesión en una obra de albañilería que sigue el recorrido de menor resistencia; si una lesión debe abrirse en una pared, primero separará los ladrillos a lo largo de las juntas de mortero, más débiles que los bloques, después en segundo lugar, puede ocurrir la rotura de un bloque. Tal efecto secundario constituye el límite del modelo: no prevé la rotura del bloque. Considerando la propiedad de la albañilería, se asume que las bielas normales sean unilaterales, o bien capaces de transmitir sólo fuerzas de compresión; en caso de fuerzas de tracción, se rompen y una vez que esto se produce y se abre una lesión - “en una albañilería, donde se tracciona se lesiona” (J. Heyman) - la misma tracción se anulará puesto que no puede verificarse sollicitación alguna. La estabilidad del arco clásico está garantizada por la existencia de una línea cualquiera de la presión interna al perfil de la estructura, con referencia a las tres hipótesis de Heyman: resistencia a compresión infinita, resistencia a cortante infinita, resistencia nula a la tracción. En términos cinemáticos, el único mecanismo de colapso posible en un arco es la flexión (4 charnelas en 4 secciones diferentes, con la alternancia intradós-trasdós), mientras resulta imposible el colapso por cortante-deslizamiento y por aplastamiento. En el caso del falso arco las hipótesis de Heyman son válidas en parte y en particular, debe ser retirada la hipótesis de ausencia de deslizamiento. La verificación de la estabilidad del falso arco ha sido efectuada con el software Brickwork, un programa de cálculo creado a propósito para el análisis de estructuras en albañilería antigua, basado en el modelo discreto. Este modelo del falso arco es realizado sobre la base geométrica del levantamiento directo hecho en el campo y la lectura, con el apoyo de las fotografías en plano, del aparejo real de la bóveda constituida por ladrillos, colocados en la mayor parte en hiladas horizontales. De hecho el modelo realizado debe reproducir exactamente la dimensión real de cada ladrillo según la posición efectiva, separados entre ellos por el exacto espesor de la junta de mortero. La modelación debe tener cuenta de la naturaleza del falso arco que, en este caso, al no tener las dovelas que determinan el espesor, como en el arco verdadero, es el resultado de un vaciado practicado en la estructura de la bóveda de cubierta, que se desarrolla con andadura ortogonal continua. Por tanto son consideradas las porciones de albañilería dentro del espesor de 18 centímetros, calculado en el intradós del arco en correspondencia con el de la clave y de las impostas. Antes de proceder con el cálculo, necesita asignar los vínculos del modelo - entre ellos los vínculos con biela para simular las juntas de mortero -, las características físico-mecánicas de los materiales - obtenidas de ensayos en laboratorio - y en fin las cargas que gravitan sobre el falso arco, o sea el peso propio de las dos porciones de bóveda que cubren las galerías comunicantes con el relleno y la pavimentación superiores y el prisma de piedra sobre el arco. Brickwork ejecuta el cálculo numérico iterativo de los esfuerzos de compresión, de tracciones y de cortante que se verifican en cada una de las bielas simples. La reiteración es producida por un número fijado de pasos, en los que el software calcula la estabilidad de la estructura, datos de la construcción de al menos uno entre los polígonos funiculares de las sollicitaciones dispuestas en el interior del perfil del arco. El paso entre dos iteraciones consecutivas sucede cuando la investigación del polígono funicular produce la rotura de una biela a tracción. El cálculo sucesivo recorre la misma operación, sin embargo eliminando la presencia de la biela rota anteriormente, y así hasta el último paso; este puede ser representado por el límite máximo de las iteraciones impuestas - arco estable - o por un paso intermedio cuando la investigación del polígono funicular interno al perfil no es otra vez posible, o sea el arco es inestable. Según los resultados del cálculo hecho por medio del software sobre el modelo discreto, el arco ha resultado estable. La valoración del cuadro de fisuras se efectúa interpretando los resultados del cálculo, con los que se individualizan las bielas simples que son juntas a rotura durante el proceso iterativo, observando las sollicitaciones que la han causado. En el esquema representado

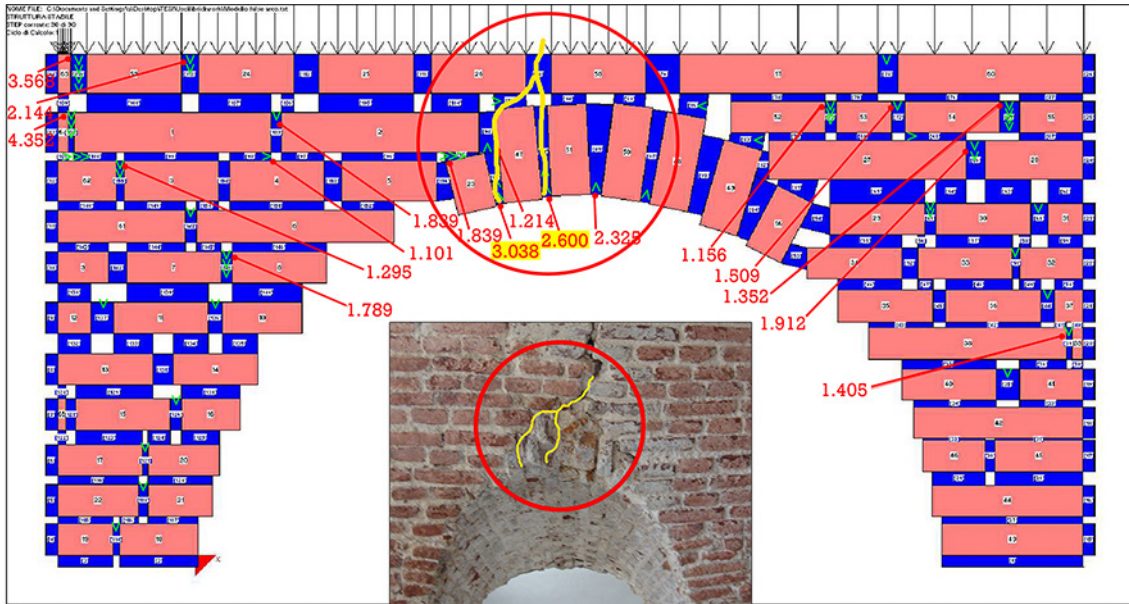


Figura 9. Valoración de los resultados del cálculo numérico con Brickwork para el análisis de la estabilidad del arco. La identificación de las solicitaciones que han producido la rotura de los vínculos con biela indica la localización de una posible lesión formada. La comparación con la realidad confirma la correspondencia de la lesión.

en la interfase gráfica del modelo, es informada la localización de los vínculos en los que es verificada la rotura de las bielas, con la evidencia de estas últimas, en las que se registran los valores de las solicitaciones superiores a  $1 \text{ kg/cm}^2$ . De la lectura de estos datos sobrepuestos, se puede valorar la localización de las juntas de mortero donde se puede formular hipótesis sobre la manifestación de microfisuras. Considerada una resistencia media a tracción de  $1,2 \text{ kg/cm}^2$  en el mortero de la albañilería del arco real, se puede afirmar, excluyendo la presencia difusa de microlesiones de pequeño alcance en la zona correspondiente a las espaldas laterales, que la microfisura de mayor alcance - solicitaciones entre  $3$  y  $2,6 \text{ kg/cm}^2$  - se localizan en posiciones ligeramente descentradas hacia la izquierda del intradós del arco, en las juntas de mortero interpuestas entre los primeros tres elementos colocados en tabiques de ladrillos. Si tal cuadro hipotético de fisuras se confronta con las lesiones existentes en la bóveda, se nota la correspondencia en la zona en que ésta intersecta el arco con análoga andadura. En conclusión, se puede decir que la lesión presente en la bóveda depende de la propia conformación del falso arco. La microfisura que corresponde a la junta de mortero representa la solución inicial de continuidad que, perdiendo el material sus propiedades mecánicas, ya de inicio muy limitadas, con el tiempo y el envejecimiento, produce el desarrollo de la lesión con su prosecución a lo largo de la dirección paralela al arco de la bóveda.

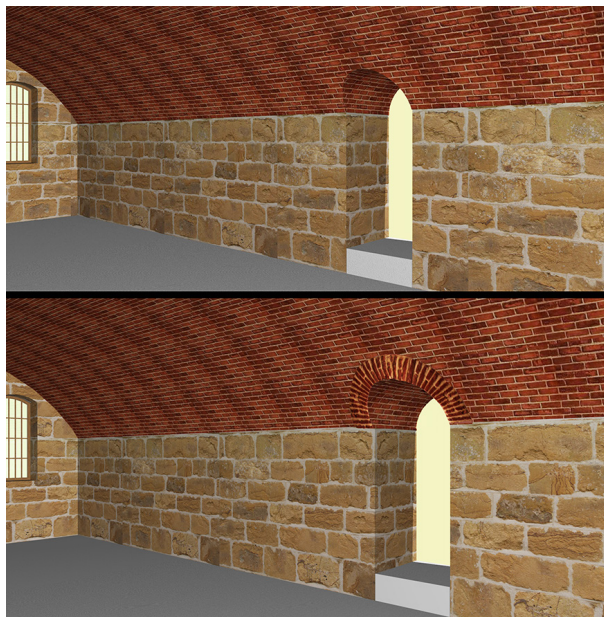


Figura 10. El problema estático es debido a la técnica de construcción del arco de paso. La representación virtual de la bóveda presenta dos casos: en arriba el arco como fue realizado, abajo como tenía que estar construido.

## 5. Conclusiones

La fortaleza representa uno de los mayores ejemplos de arquitectura militar renacentista en América, quizás del mundo, reconocida como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Al monumento, de inmenso valor histórico-cultural, le falta aún una adecuada valorización y la clara impresión para quien desde la ciudad, demasiado poco para decir la verdad, cumple su “pequeño viaje” para visitarlo, es la de un poderoso edificio en estado de semi-abandono. El destino del Morro durante los siglos ha sido similar al de otros artículos arquitectónicos de uso parecido. Las funciones militares han garantizado su originalidad, conservando en el tiempo la sustancia de la valencia del diseño arquitectónico creado por Antonelli. El momento actual marca un importante criticismo que deberá dar cuenta de una renovada interpretación de la fruición del monumento por parte de la comunidad. Deberá ser puesta una firme sensibilidad en las estrategias de reutilización y en la vocación de este complejo de arquitectura de tierra, de roca y de piedra, así en fuerte simbiosis con la característica natural del territorio del que surge y con el mar, que marca sus “arrugas” y amenaza su apoyo. El alma racional y pragmática de la arquitectura militar deberá tener cuenta de las tentaciones estéticas para un nuevo uso social, teniendo siempre alta la atención sobre los temas de la estabilidad, estática y seguridad de estos poderosos gigantes de piedra, que parecen indestructibles y eternos, sino que muchas veces, después de un análisis profundo de la técnicas constructivas, revelan un alma frágil de tierra.

### Fuentes y bibliografía:

BLANES MARTÍN, T., 1998: *Castillo de los Tres Reyes del Morro de la Habana: historia y arquitectura*, La Habana, Editorial Letras Cubanas.

BRUNI, A., 2009: *Il Castello de los Tres Reyes del Morro de La Habana. Rilievo e documentazione di un'opera antonelliana nei caraibi*, Tesis de graduación, Facultad de Arquitectura de la Universidad de Florencia, A.A. 2009-2010.

USELI, G., 2013: *Il Castello de Los Tres Reyes del Morro dell'Avana. Analisi del degrado e della consistenza statica del complesso*, Tesis de graduación, Facultad de Arquitectura de la Universidad de Florencia, A.A. 2012-2013.

GALASSI, S., PARADISO, M., PIERONI, E., TEMPESTA, G., 2011: *Analisi di strutture in muratura soggette a vincoli cedevoli: un algoritmo di calcolo non lineare*, en *Atti del XX Congresso Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata AIMETA 2011*, 12-15 Settembre 2011, Bologna, Publi&Stampa Edizioni.

GALASSI, S., PARADISO, M., PUGI, F., TEMPESTA, G., 2007: *Sistemi voltati in muratura. Teoria e applicazioni*, Roma, Edizioni DEI.

GASPARINI, G., 2007: *Los Antonelli. Arquitectos militares italianos al servicio de la Corona española en España. 1559-1649, Africa y America*, Caracas, Ed. Arte.

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

<http://www.provincia.fc.it/cultura/antonelli/index.html> (consultado el 23/07/2013)

<http://pares.mcu.es/> (consultado el 04/11/2013)