



DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DINÁMICAS DE LA FORTALEZA DE SAN JUAN DE ULÚA

Francisco Williams Linera⁽¹⁾, Alejandro Vargas Colorado⁽¹⁾, Regino Leyva Soberanis⁽¹⁾, Guadalupe Riquer Trujillo⁽¹⁾, Javier Lermo Samaniego⁽²⁾, Sara Sanz Molina⁽³⁾, Roberto Rivera Baizabal⁽¹⁾

- ¹ Instituto de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Av. S. S. Juan Pablo II, s/n, Campus Mocambo, Fracc. Costa Verde, C.P. 94294, Boca del Río, Ver., México, Tel. (229) 7752000 ext. 7, 22214, franciscowilliamslinera@yahoo.com.mx, avargas@uv.com.mx, reginol@yahoo.com, guadaluperiquer@yahoo.com.mx, rrivera_baizabal@hotmail.com
- ² Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Torre de Ingeniería, 2do. Piso, Ala Sur, Cub. 8, Cd. Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, México, D.F., Tel. (55) 56233500 ext.1264, jles@pumas.iingen.unam.mx
- ³ Titular del Museo Local Fuerte de San Juan de Ulúa, Instituto Nacional de Antropología e Historia, Islote de San Juan de Ulúa s/n, Veracruz, Ver., México, Tel. (229) 9385151, sara_sanz@inah.gob.mx, saneli2@hotmail.com

RESUMEN

Con registros de vibración ambiental se estimaron en los suelos del entorno el efecto de sitio y en los componentes de la estructura, el primer modo de vibrar. Estos estudios corresponden a la primera etapa de un proyecto que tiene como objetivo final determinar la vulnerabilidad de la fortaleza ante efectos sísmicos y a otras vibraciones de origen natural y antropogénico. La estructura es de tipo militar de gruesas paredes de “piedra mucar”, ubicada en el islote de coral y relleno de San Juan de Ulúa frente a la ciudad de Veracruz, México. Construida durante los siglos XVI al XVIII, es hoy un monumento histórico, custodio de importantes tiempos mexicanos y referencia de América.

ABSTRACT

Environmental vibration records were used to estimate site effect of surrounding soil and the first mode of vibration in structure components. These studies are the first stage of a project which final purpose is to determine vulnerability of the fortress to effects of seismic and other natural and anthropogenic vibrations. The Fortress of San Juan de Ulúa structure is military typed with thick walls of “Mucara stone”, located in a small coral island in front of Veracruz City, Mexico. It was built between XVI and XVIII centuries, and at present day it is an historical monument, guardian of important Mexican events and an American reference.

INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describen las actividades realizadas para el registro de vibraciones en La Fortaleza de San Juan de Ulúa, empleando una metodología no invasiva ni contaminante, que consistió en la colocación superficial de sismómetros de banda ancha, tanto en el terreno de desplante de la estructura como en diversos sitios de interés de La Fortaleza. Con los registros de vibración ambiental obtenidos, se pudo estimar el efecto de sitio en los suelos del entorno e identificar los períodos fundamentales de vibrar de la estructura en sus diferentes componentes.

El conjunto estructural que conforma La Fortaleza, es una combinación de proyectos y construcciones, donde emplearon materiales y métodos constructivos diversos que dan inicio a mediados del siglo XVI. Erigido en un islote, que en parte está formado por diversos espesores de rellenos con características varias frente a la ciudad y Puerto de Veracruz. El desarrollo del puerto, lo ha abrazado casi hasta el agobio, donde La Fortaleza parece perder su poderío a pesar de los esfuerzos que hace el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Las patologías que presenta esta estructura de tipo militar son preocupantes, y solo con la mirada se aprecian: grandes agrietamientos, asentamientos, desplomes y degradación de sus materiales, entre otras. Sus pasillos mazmorras y baluartes de coral, parecen esperar pacientemente el desenlace de los expiados.

ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El islote Tecpan Tlayácac, era el nombre prístino de Ulúa: santuario de *Yacatecuhtli* señor de la nariz, dios y guía de los mercaderes. En 1518, por incorrecta interpretación, el expedicionario español Juan de Grijalva llama al islote San Juan de Ulúa. Ulúa pudo haber sido un islote predestinado a ser un punto de orientación en las rutas marítimas, aún antes de la llegada de los españoles; su contorno al parecer servía como comarca de embarque y desembarque para rutas comerciales desde el altiplano hasta el territorio veracruzano. Por su ubicación geográfica estratégica, y sus características de fondeo, los navíos españoles de Hernán Cortés (1519), también hallaron en la isla un puerto de abrigo seguro de los vientos del norte, y establecen en ella un asentamiento militar. En 1535 el virrey Don Antonio de Mendoza realiza un reconocimiento y obras de defensa, y las crónicas ya describían una torre baja para la defensa y un muro de mampostería (antecedentes del *muro de las argollas*) como nociones de la hoy Fortaleza de San Juan de Ulúa. En ella se concentran casi 500 años de tiempo mexicano, y es testimonio de la historia americana moderna. Inmueble privilegiado en la herencia cultural de la humanidad, desde la ocupación por los españoles de la isla Tecpan Tlayácac, hasta 1962, cuando se decretó su protección como monumento colonial. Emblema del inicio y conclusión del período colonial; operó como puerto de navíos, defensa de la ciudad contra los hostiles, y fue la última guarnición fiel a la corona española en el movimiento libertador de la Nueva España (1825). Como prisión, contuvo desde extravagantes personajes hasta patriotas mexicanos. En 1853, estuvo Juárez 12 días previos al exilio ordenado por Santa Anna. En 1914 Venustiano Carranza cambia ese capítulo oscuro usándola como residencia, entregándola a la armada para el arsenal nacional en 1916, destino que tuvo hasta 1962 cuando el presidente Adolfo López Mateos lo decretó monumento histórico, y pasó a ser parte del INAH. Es uno de los monumentos históricos más entrañados en México por su historia y leyendas que lo envuelven, sus visitantes acuden curiosos por ver, entre otras cosas, la tinaja que sometió al peculiar ladrón Chucho el Roto.

EVOLUCIÓN CONSTRUCTIVA

En 1535 llega a Veracruz el primer virrey Don Antonio de Mendoza con la orden de realizar en Veracruz un reconocimiento y obras de defensa. Sabemos por las crónicas de los viajeros que arriban a Ulúa que existía una torre para la defensa de la altura de un hombre y un muro de mampostería.

Para 1552 en Ulúa solo existía una torre, y el virrey Luis de Velasco con ayuda del alcalde de la ciudad García de Escalante y Alvarado, realiza obras de defensa en aquella torre y muro, para defensa del puerto ante un ataque pirata. Ese año un huracán destruye las construcciones de madera, y días después Hernando de Vergara describe entre los daños en la isla, inicios de una torre que queda sobre el agua y una casa grande de madera adosada a un muro, que luego será el muro de las argollas.

En 1556 solo existe de mampostería un muro hecho a mano con piedra arenisca y cascajo, con cuatro brazas de fondo, frente al cual los buques grandes anclan muy cerca de la orilla.

En 1568 en su ataque a Ulúa el pirata John Hawkins la describe: *“es de saber que este puerto se forma de una isleta de piedra que en lo más alto no sobresale del agua tres pies, y por cualquier rumbo no tiene más extensión que un tiro de ballesta: el doble o algo más dista de la tierra firme, y no hay en toda aquella costa otro paraje donde los buques puedan estar con seguridad, por el viento norte sopla con tanta violencia, que si los buques no están firmemente amarrados, con las anclas aseguradas en la dicha isla, no hay más remedio que perecer, cuando sobrevienen el norte”*. Tras este ataque se decide terminar la muralla, acabar la torrecilla y colocar otra torre al final de la muralla en el sur. Las obras seguirán igual hasta la llegada del capitán Cristóbal de Eraso en 1570, quien impulsa las obras de lo que más tarde será el muro de las argollas y la torre vieja o los inicios del Baluarte de San Pedro y la torre de San Crispín (figura 1). Menciona que los cimientos son del mismo ancho del muro, coloca un baluarte (San Crispín) con caballero en el lado sur, que no pasa de una plataforma para colocar artillería. Los muros son de piedra de cantería por el exterior y el interior de mampostería, muro de tres hojas, dos exteriores de cantería e interior mampostería, en talud con una diferencia de 5 pies: 18 pies en la base y 13 en la parte superior, con un aljibe en la parte superior. El caballero de la torre de San Crispín deberá de quedar sobre arcos de piedra de cantería, con muros de 18 pies de alto y de espesor 13 pies, donde se colocará en la parte alta artillería.



En la zona no existe piedra para realizar la construcción de La Fortaleza, y los primeros sillares usados vienen de Campeche o de La Habana. Al paso del tiempo se decide utilizar piedra de mar o múcará, múca, que es un coral de la familia de las madréporas, que se extrae de los bajos de la Gallega posterior a Ulúa. La piedra de cal se trae de zonas próximas a Veracruz.

En 1590 llega a Veracruz el ingeniero militar Bautista Antonelli, para diseñar las obras de La Fortaleza, pero nada se lleva a cabo, únicamente el traslado de la ciudad desde la Antigua a las playas frente a Ulúa, llamadas Ventas de Buitrón. Por el plano de Antonelli podemos ver la forma de la isla (figura 2), y menciona que en marea alta o mal tiempo la parte posterior a la fortaleza se cubre de agua. Existe en la zona más alta un grupo de construcciones en madera, que son la casa de los negros del rey, los almacenes, iglesia, hospital, un puente que comunica las dos secciones de la isla, y la casa del alcalde. Se observa el muro de las argollas, con los barcos sujetos a esta, la torre vieja y el baluarte y el “caballero de San Crispín”. En 1670 el ingeniero Marco Lucio en un plano menciona que la parte posterior de la isla queda descubierta en bajamar y le llama “placer”. Por el frente del muro de las argollas marca las brazas de profundidad del puerto que van de 5.3 a 7. La forma del edificio para este momento sigue siendo un muro y dos torres (figura 3). En 1698 el ingeniero Jaime Frank se encarga de las obras, y en cinco años le da la forma de un paralelogramo con un baluarte y dos medios baluartes (figura 4). Sigue las reglas del Arte de la Fortificación, con un recinto cerrado abaluartado. Termina el Baluarte de La Soledad, con sus flancos y caras, un medio baluarte para Santiago, un añadido junto a la torre vieja o de San Pedro y una batería baja anexada al lado sur del Baluarte de San Crispín. Sobre la base de este baluarte y de la obra realizada por Eraso, Frank construye una torre con espacios interiores, sobre la sala de armas, quedando un verdadero caballero. Las cortinas y sus espacios terraplenados son de poco ancho, pero admite la artillería. En el patio central o Plaza de Armas, se aprecia una dársena interior, un almacén de pólvora, la capilla y la casa del castellano. Frank construye hacia la parte posterior del islote, dado que todo el terreno es un bajo arrecifal que en marea baja queda al descubierto tiene que ir rellenando para poder sacar la obra y construir la cimentación. La cimentación empleada serán pilotes de madera de zapote, y para colocarlos se construyen recintos estancos o tablestacas. Mr. de Pfeffinger explica que la cimentación se realiza clavando estacas previamente endurecidas con fuego y untadas con brea para evitar que se pudran. Para protección de la cimentación del fuerte oleaje, se coloca por el exterior del lado norte una barrera formada por cañones viejos. A finales del siglo XVII y principios del XVIII se inicia el empleo de muros mixtos con piedra múcará y ladrillo por la escasez de la primera, que era utilizada también para la construcción de los edificios en la Ciudad de Veracruz. Para inicios del XVIII los proyectos son variados, pero algunas obras son cruciales para la transformación de Ulúa. El ingeniero Agustín López de la Cámara Alta, en 1762 proyecta obras de avanzada en el frente norte con la construcción de la plataforma de San Joseph, que dará lugar después al Revellín de San José y las dos baterías bajas que cubren los baluartes de Santiago y La Soledad.

En 1763 el ingeniero militar Manuel de Santistevan realiza adecuaciones a la plaza (figura 5), entre ellas: Ampliación de las cuatro cortinas para situar la artillería. Por la parte interior, la ampliación de los espacios abovedados para mayor alojamiento de tropas, y almacenes. La corrección del baluarte de Santiago, dejándolo con sus dos flancos y caras. La corrección del baluarte de San Crispín y las modificaciones en el interior, iniciadas unos años atrás, como es el relleno de la dársena. Se conservan la iglesia y el almacén de pólvora, así como la Casa del Castellano, que se desplazaría posteriormente por la ampliación de la cortina oriente. Se construye la ampliación de una sección de bóvedas adosadas a las existentes del muro de las argollas.

En el exterior las obras propuestas por Cámara Alta se modifican, se demuele el llamado Revellín de San Josep que prácticamente era una plataforma y se construye el nuevo Revellín, incluidos los aljibes, y un espacio al centro del Revellín libre, en donde en otra etapa se colocará el reducto del mismo con los tres almacenes de pólvora.

Las ampliaciones son cimentadas con pilotes de madera de zapote, con un envarengado o emparillado de madera sujeto sobre la cabeza de los pilotes, con un relleno de piedra pequeña. Sobre esta superficie se colocan los sillares para la formación del cimientado (figura 6). Los muros son los conocidos como muros de tres hojas, dos de sillería por el exterior e interior de piedras largas y angostas asentadas con mezcla cal-arena, y el relleno de mampostería de ripio o piedra pequeña bien acuñada mezclada con mucha cal-arena.

Las bóvedas se realizan con tres roscas de ladrillo ligadas entre sí para resistir el impacto de las bombas. Con un relleno de 6 pies, generalmente de piedra múcará. El acabado exterior de las bóvedas se forma con una capa de mezcla de hormigón pisado, formada por cal apagada, polvo de ladrillo, arena gruesa y cal viva (figura 7).

Cierra el frente defensivo del norte el camino cubierto con sus dos plazas de armas entrantes que protege las caras del Revellín, junto con las baterías bajas de Guadalupe y San Miguel que flanquean los baluartes de Santiago y La Soledad.

En 1785 el ingeniero Miguel del Corral muestra en un plano a La Fortaleza con todas sus defensas. En exteriores el Revellín cubre sus caras con dos elementos de defensa: los lunetos de nuestra Señora del Pilar y el de Santa Catarina. El edificio principal está totalmente terminado, la Plaza de Armas queda dividida en dos por la cortadura de San Fernando que incluye en su trazo parte del almacén de pólvora que estaba en el patio central. Desaparecieron los almacenes, la capilla, y la Casa del Castellano se traslada al frente, dejando un patio trasero entre esta y la cortina oriente. Todo el edificio está rodeado por un foso inundado por agua de mar, recordemos que parte del islote es un bajo que en marea alta se cubre con agua, por lo tanto se está aprovechando una de las ventajas del sitio.

En la figura 8 se presenta un corte de La Fortaleza en donde se puede apreciar la cimentación de los muros apoyada sobre pilotes.

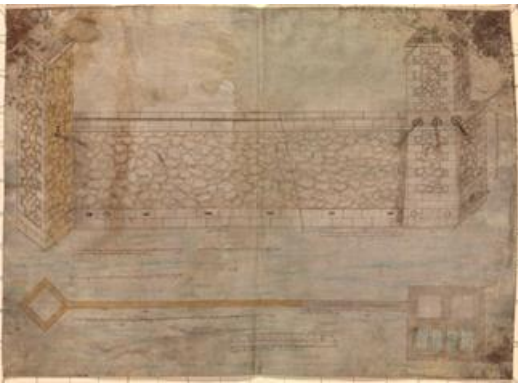


Figura 1. Plano de Cristóbal de Eraso

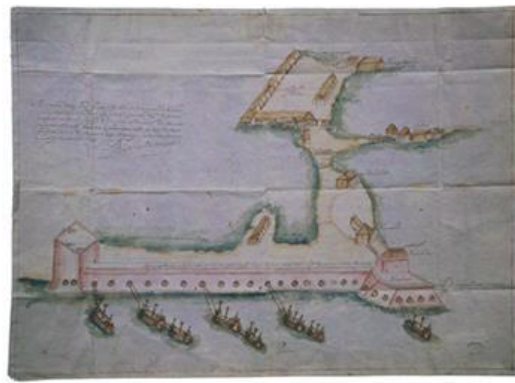


Figura 2. Plano de Bautista Antonelli



Figura 3. Plano de Marco Lucio

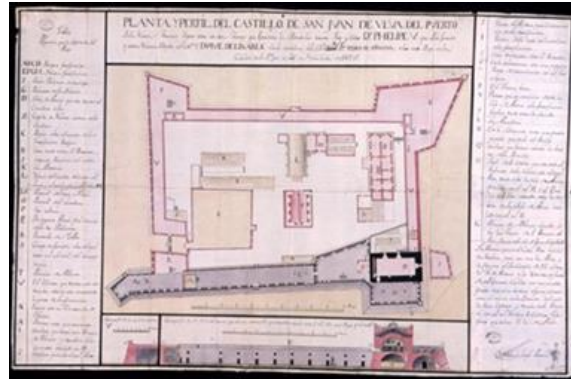


Figura 4. Proyecto de Jaime Frank

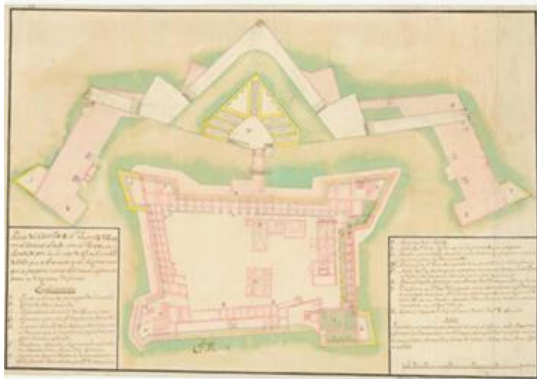


Figura 5. Proyecto de Manuel de Santistevan

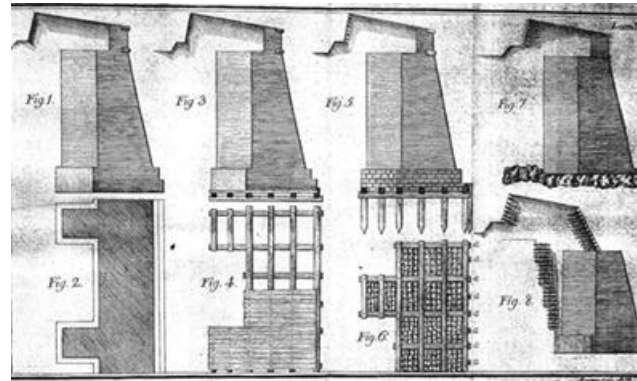


Figura 6. Construcción de cimientos. Según el tipo de suelo, figuras 5 y 6 cimentación con pilotes de madera y embargado. Müller John. Tratado de Fortificación

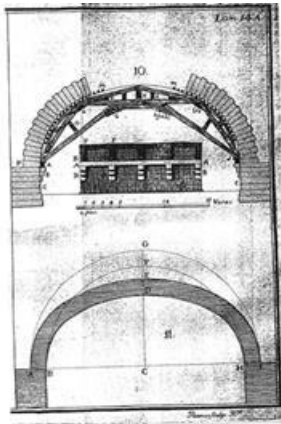


Figura 7. Construcción de bóvedas de roscas de ladrillo.

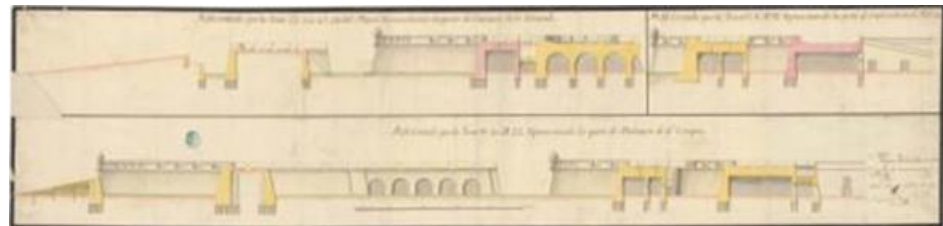


Figura 8. Perfil de los baluartes de La Soledad y San Crispin 1774.

DESARROLLO AL ENTORNO DEL ISLOTE

Al paso de los años (figura 9) y ante la necesidad de crecimiento de la industria naval y portuaria, el islote fue casi rodeado por terrenos ganados al mar, apoyados sobre el mismo arrecife del Bajo de la Gallega, lo que permite su acceso por tierra. Sobre estos terrenos se desarrolla una gran actividad portuaria y naval (figura 10); en uno de sus bordes se encuentra construido el muelle marginal de la Terminal Especializada de Contenedores (TEC), perteneciente a la empresa Internacional de Contenedores Asociados de Veracruz S.A. de C.V. (ICAVE), la industria naval como los Talleres Navales del Golfo (TNG), instalaciones militares como el Arsenal Nacional e instalaciones de Petróleos Mexicanos (PEMEX). La dinámica del funcionamiento de estas instalaciones, constituyen fuentes varias de vibraciones, que se unen a otros agentes de origen natural (sismos, vientos, oleaje, corrosión, etc.) y antropogénicos (contaminación ambiental, depredación, etc.), que acometen a La Fortaleza.

ESTADO ACTUAL DE LA FORTALEZA

En las figuras 13, 14 y 15, se presentan los nombres, distribución y detalles de los principales elementos estructurales que conforman La Fortaleza como son: Baluarte de San Pedro, Baluarte de San Crispín, Baluarte de La Soledad, Baluarte Santiago, Plaza de Armas, El Revellín de San José y el Muro de las Argollas.



1635 Ing. Adrian Boot

Siglo XVIII

Figura 9. Vistas antiguas de la Ciudad de Veracruz y La Fortaleza de San Juan de Ulúa



Figura 10.- Crecimiento de la zona

Paradójicamente, los vecinos que lo rodean en los terrenos de rellenos ganados al mar, mitigan los embates del viento, oleaje y desplazamiento de agua por navegación en la parte norte, zona que presenta menor deterioro, no siendo así hacia el sur, donde tiene daños estructurales muy notorios. El muro de las argollas con los Baluartes de San Pedro y Baluarte de San Crispín, génesis de La Fortaleza, son las zonas más dañadas. El oleaje natural y el ocasionado por el desplazamiento de grandes volúmenes de agua, producto de la navegación de monumentales buques cargueros, ha golpeado durante años esta fachada, ocasionando principalmente daños en la cimentación, y parte de los pilotes que la constituyen han quedado socavados. Para disminuir este efecto, una de las obras más



importantes realizadas en épocas recientes es un tablestacado, hincado frente al muro de las argollas que disminuye el golpe del agua. Sin embargo, el daño está hecho, en el Baluarte de San Pedro (figura 11) existen grandes grietas que llegan a medir casi 10 cm, donde entra un puño, y recorren muros, arcos y bóvedas; el desplome de los Baluartes es notorio a simple vista, y los asentamientos diferenciales son evidentes (figura 13). Al Baluarte de San Crispín, solo se puede acceder hasta el caballero, pues las condiciones de deterioro e inestabilidad de la torre ya son críticas. La humedad, corrosión y contaminación, se agregan a la degradación de sus superficies.

Desde la segunda mitad del siglo XX se han realizado varios proyectos para el rescate de La Fortaleza. En el año de 1999 se interviene el puente de “Los Suspiros” que comunica a La Fortaleza con el Revellín de San José con trabajos de recimentación de los pies derechos del puente y la restauración del mismo. Posteriormente durante los años 2003 y 2004 se llevan a cabo trabajos de estabilización del suelo marino y de La Fortaleza a través de un pilotaje laminado y también trabajos de consolidación de la cimentación. Durante el año 2005 se construye el tablestacado metálico frente al muro de las argollas para evitar la pérdida del suelo marino debido al oleaje.



Figura 11. Grietas en la estructura del Baluarte de San Pedro

GEOLOGÍA-GEOTECNIA

Las condiciones geológicas, geofísicas y geomorfológicas de un espacio geográfico, constituyen el fundamento de las peculiaridades de su relieve, aun cuando éste tenga un origen antropogénico (rellenos). Es por ello necesario analizar la zona donde se desarrollarán las mediciones de vibración ambiental.

El basamento veracruzano está compuesto por complejos volcánicos intrusivos (Hernández et al. 2007), sobre de éste, a finales del Terciario y principios del Cuaternario se formaron los arrecifes o depósitos de coral que constituyen los principales depósitos carbonatados y terrígenos que forman los arrecifes coralíferos frente a la costa de la ciudad de Veracruz (figura12). Están formados por duros exoesqueletos de enormes colonias de pólipos, que forman una roca muy porosa de caliza de color blanco amarillento, conocida como madrepora y por abundantes fragmentos de conchas de moluscos (Capallera et al. 2012). Estas formaciones están a diferentes niveles, por lo que los rellenos usados para ganarle área al mar también tienen características diversas, que tienen respuestas dinámicas diferentes (*efecto de sitio*) ante un mismo agente excitador.

Los rellenos que dan el relieve actual de la zona se hicieron en distintas épocas, y tienen, posiblemente, diferente grado de consolidación, o incluso diferentes características en su composición.

Debido a esta situación se consultaron estudios de mecánica de suelos y trabajos relacionados con el tema (Páez, 2001) para conocer las características geotécnicas de los suelos de la zona.



Baluarte de San Pedro

Baluarte de San Crispín

Figura 14. Ubicación de puntos de vibración ambiental



Baluarte de La Soledad

Baluarte de Santiago

Figura 15. Ubicación de puntos de vibración ambiental

Tabla 1. Puntos de registro de vibración ambiental en La Fortaleza

Identificación	Ubicación	Sitio	Tiempo de registro	Orientación de los sensores
1S	Baluarte de San Pedro	Nivel de Piso	2 hrs. / 20 min.	G/L
2S	Baluarte de Santiago	Nivel de Piso	2 hrs. / 20 min.	G/L
3S	Baluarte de San Crispín	Nivel de Piso	2 hrs. / 20 min.	G
4S	Baluarte de La Soledad	Nivel de Piso	2 hrs. / 20 min.	G/L
5S	Baluarte de San Pedro	Nivel de Torre	2 hrs. / 20 min.	G/L
6S	Plaza de Armas	Nivel de Piso (centro)	2 hrs. / 20 min.	G/L
7S	El Revellín de San José	Nivel de Piso	2 hrs. / 20 min.	G
8S	Baluarte de San Pedro	Nivel de Azotea	20 min	G/L
9S	Baluarte de San Crispín	Nivel de base de la Torre (caballero alto)	20 min	G
10S	Baluarte de San Crispín	Nivel de Azotea	20 min	G
11S	Baluarte de San Crispín	Nivel de Piso	20 min	G
12S	Baluarte de La Soledad	Nivel de Azotea	20 min	G/L
13S	Baluarte de Santiago	Nivel de Azotea	20 min	G/L
14S	Revellín de San José	Nivel de Azotea	20 min	G
15S	Baluarte de San Crispín	Nivel de Azotea	20 min	L
16S	Punto Intermedio entre San Crispín y La Soledad	Nivel de Azotea	20 min	L
17S	Punto Intermedio entre La Soledad y Santiago	Nivel de Azotea	20 min	L
18S	Punto Intermedio entre Santiago y San Pedro	Nivel de Azotea	20 min	L



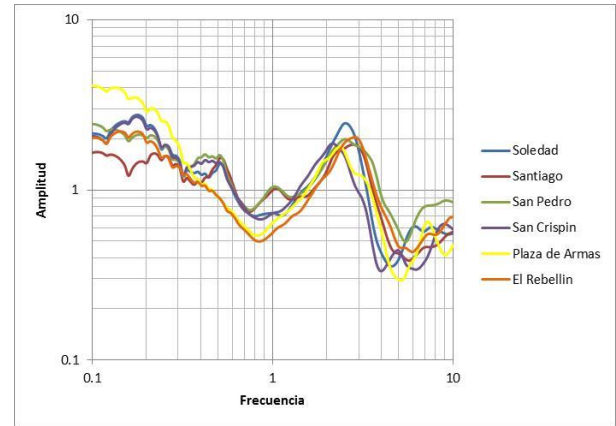
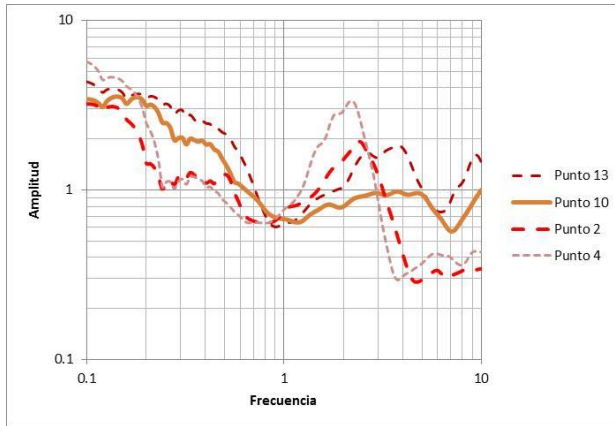
Figura 16. Distribución de puntos de vibración ambiental en el entorno al islote de San Juan de Ulúa

EFECTOS DE SITIO

Con los registros de vibración ambiental (microtremores) se puede obtener una buena estimación de la frecuencia de resonancia del suelo (efecto de sitio), usando para ello la relación espectral entre los movimientos horizontales y verticales (H/V) de un mismo registro de ruido, conocida como Técnica de Nakamura (Nakamura, 1989). Esto se ha estudiado ampliamente señalando sus ventajas y limitaciones (Lermo et al. 1994a,b), observado que la amplificación determinada solo es una idea burda de la real. A la relación H/V se le han dado diversas explicaciones: suponer que los microtremores se componen principalmente de ondas superficiales, relacionándolas con las ondas Rayleigh, mientras que otros autores postulan que las ondas de cuerpo dan el pico máximo de la relación H/V. Sánchez-Sesma et al. (2011), asume que el ruido es una onda de campo difuso que contiene todo tipo de ondas elásticas que dan una idea física de profundidad, lo que explica el éxito de una de las técnicas más utilizadas hoy en día.

Partiendo de lo planteado anteriormente, se llevaron a cabo registros de 2 horas de ruido, usando sismómetros de banda ancha marca Guralp. Se aplicó el programa GEOPSY para obtener la función de transferencia empírica promedio FTE de las dos direcciones horizontales, y se observa que esta FTE así obtenida es un buen estimador de la frecuencia de resonancia del sitio.

El efecto de sitio se evaluó en los pisos de los cuatro baluartes, en la Plaza de Armas y en el Revellín de San José. También se emplearon registros de sitios cercanos a la fortaleza (figura 16) con fines comparativos. De las gráficas de H/V presentadas en la figura 17, se puede deducir que varios de los puntos mostrados tienen el mismo efecto de sitio, situación que se puede corroborar con el mapa de 1907 (figura 18) de la siguiente manera: Los sitios de La Fortaleza estudiados corresponden a rellenos al igual que los puntos 2 y 4. El punto 10 se localiza en una zona en la que antiguamente se podían ver afloramientos de bancos de coral durante la marea baja y por consiguiente los espesores de relleno son mínimos, lugar conocido como el bajo de la Gallega, en este sitio no se presenta ningún efecto de sitio como se puede apreciar en la figura 17, por lo tanto se consideró como estación de referencia (estacionamiento de instalaciones de PEMEX).



a).- FTE puntos fuera de la fortaleza.

b).- FTE pisos de la Fortaleza.

Figura 17. Efecto de Sitio en puntos cercanos y dentro de La Fortaleza. Técnica de Nakamura (H/V).



a).- Islote y arrecifes

b).- Mapa de 1907 vs. estado actual

Figura 18. Parte del Mapa de Veracruz de 1907 (Comisión Geográfica Exploradora).

Una vez justificado el punto 10 como estación de referencia se aplicó la técnica estándar para determinar las funciones de transferencia de los pisos de los baluartes, Plaza de Armas y El Revellín de San José con respecto al punto 10 (figura 19), estimándose de esta manera un periodo del suelo de 0.33 seg. (3 Hz).

El punto 2 por su cercanía al Baluarte de San Pedro y en base a las FTE mostradas en figura 17 se considera que ambos sitios tienen una respuesta similar (efecto de sitio). Para justificar lo anterior se obtuvieron las funciones de transferencia (Técnica Estándar) de las componentes horizontales de estos sitios con respecto a la estación de referencia (2/10 y 1S/10) y son mostradas en la figura 20.

En base a los resultados presentados, se estima que el periodo de vibrar del suelo de desplante de La Fortaleza se encuentra en el rango de 0.33 a 0.40 seg. (2.5 a 3 Hz).

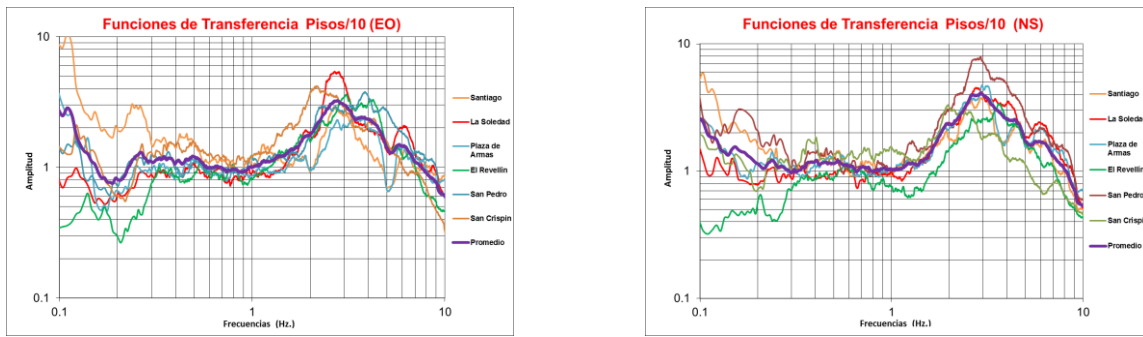


Figura 19. Funciones de Transferencia (Pisos/Estación de Referencia)

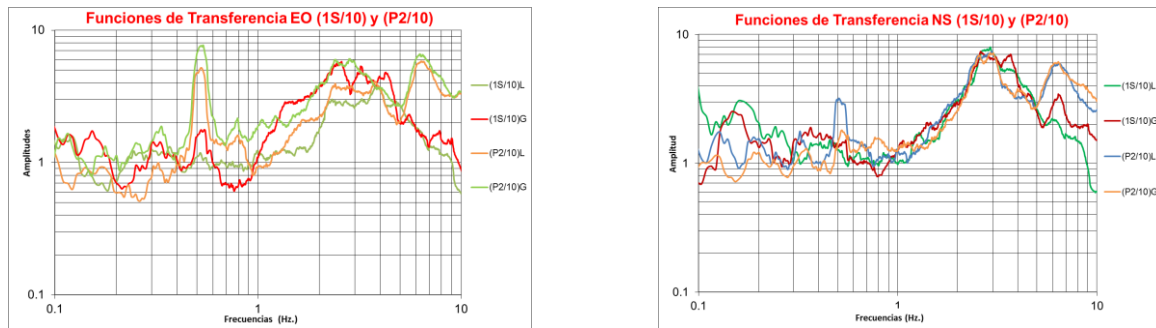
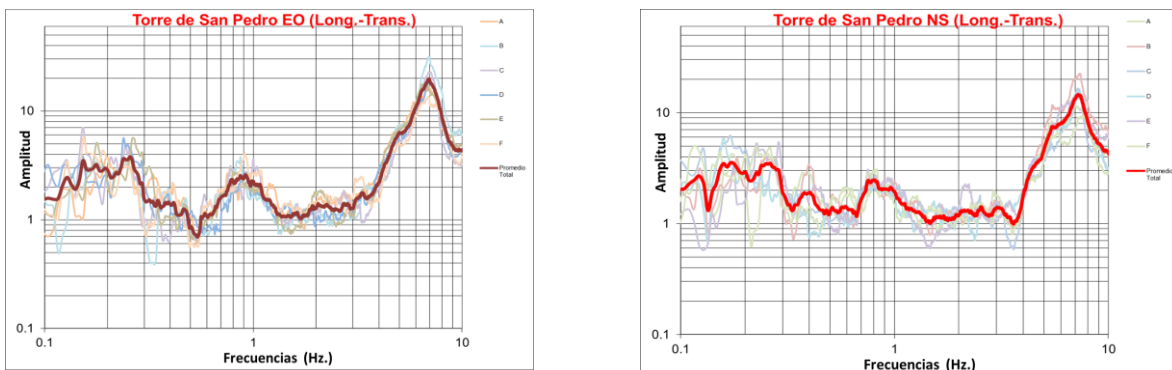


Figura 20. Funciones de Transferencia (2/10 y 1S/10)

DETERMINACIÓN DE LOS PERIODOS FUNDAMENTALES DE LOS DIFERENTES COMPONENTES ESTRUCTURALES DE LA FORTALEZA

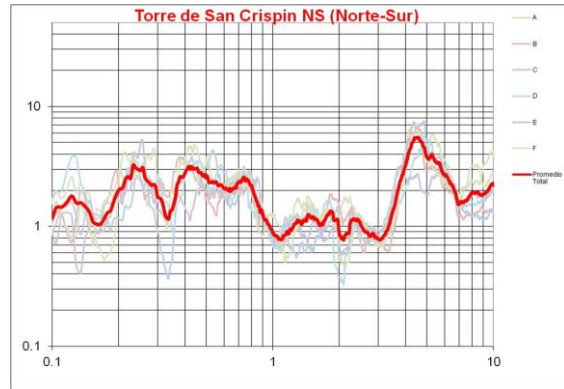
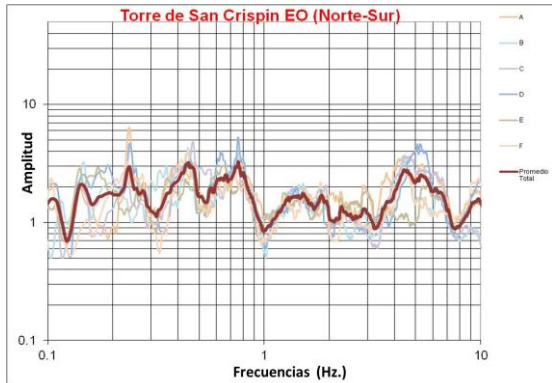
A partir de los espectros de amplitudes de Fourier obtenidos empleando los registros de vibración ambiental tomados a nivel de piso, nivel de azotea y nivel de torre para las componentes horizontales, se determinó la función de transferencia para los sitios de interés, dividiendo el espectro de amplitudes en el nivel de interés entre el espectro de amplitudes a nivel de piso. La función de transferencia determinada de esta manera logra matemáticamente que las frecuencias de la estructura predominen y se desvanezcan las frecuencias del suelo y de la fuente ambiental de excitación (Argudo, 1995).



a).- Periodo en Torre
Dirección Longitudinal, $T= 0.14$ seg. (7.0 Hz.), $A=15$

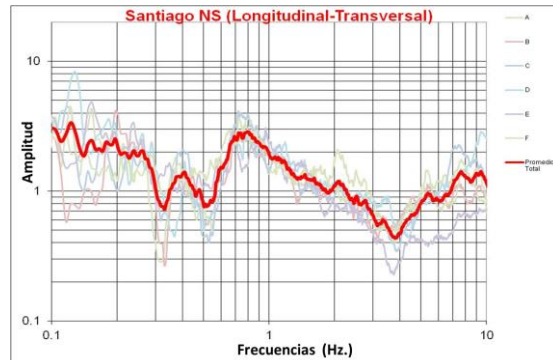
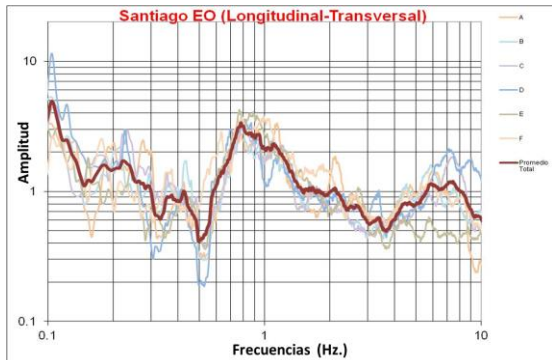
b).- Periodo en Torre
Dirección Transversal, $T= 0.13$ seg. (7.2 Hz.), $A=20$

Figura 21. Baluarte de San Pedro, función de transferencia (5S/1S)L



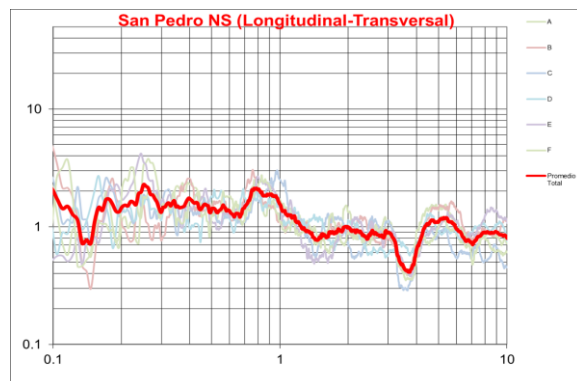
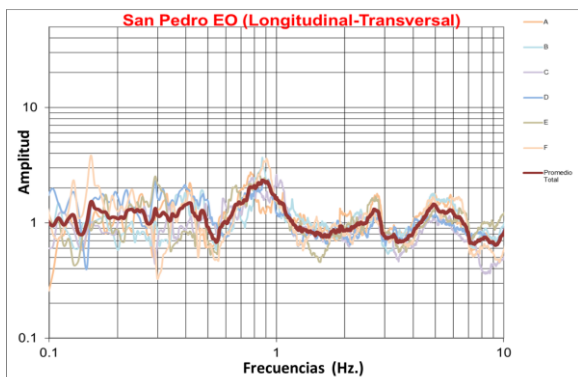
a).- Periodo del caballero alto
Dirección Este-Oeste, $T= 0.222$ seg. (4.5 Hz.), $A= 3$
Figura 22. Baluarte de San Crispín, función de transferencia (9S/3S)G

b).- Periodo del caballero alto
Dirección Norte-Sur, $T= 0.222$ seg. (4.5 Hz.), $A=5$



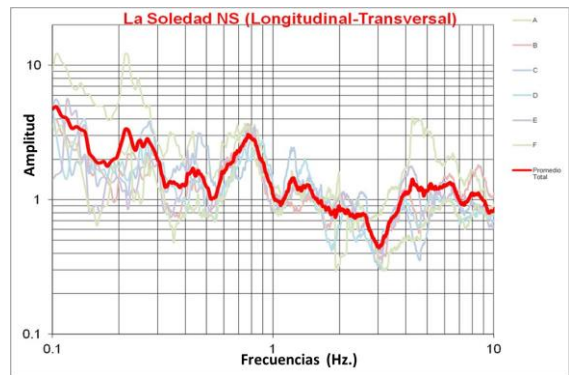
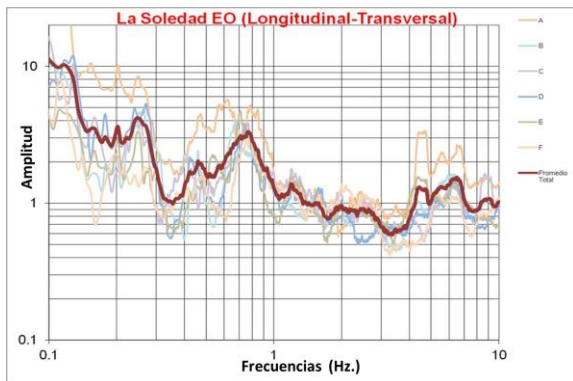
a).- Periodo en Azotea
Dirección Longitudinal, $T= 1.28$ seg. (0.78 Hz.), $A= 3$
Figura 23. Baluarte de Santiago, función de transferencia (13S/2S)L

b).- Periodo en Azotea
Dirección Transversal $T= 1.25$ seg. (0.80 Hz), $A=3$



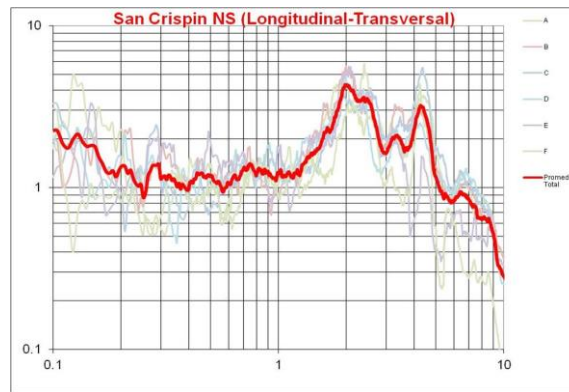
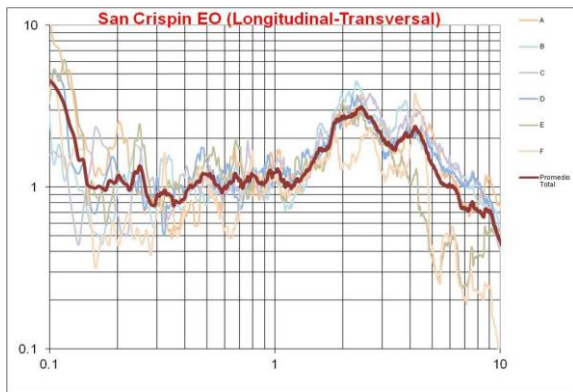
a).- Periodo en Azotea
Dirección Longitudinal, $T= 1.18$ seg. (0.85 Hz.), $A= 2$
Figura 24. Baluarte de San Pedro, función de transferencia (8S/1S)L

b).- Periodo en Azotea
Dirección Transversal $T= 1.25$ seg. (0.80 Hz), $A=2$



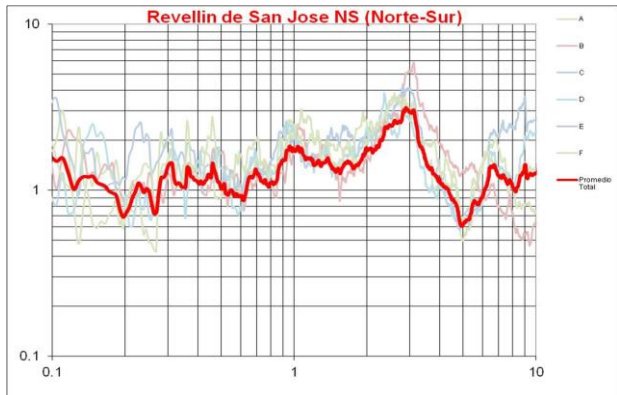
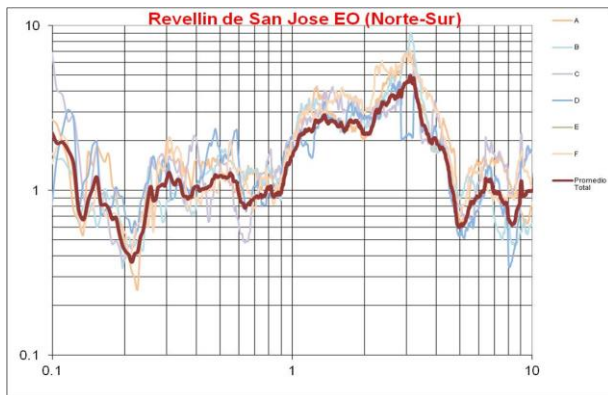
a).- *Periodo en Azotea*
 Dirección Longitudinal, $T= 1.28$ seg. (0.78 Hz.), $A=3$
 Figura 25. Baluarte de La Soledad, función de transferencia (12S/4S)L

b).- *Periodo en Azotea*
 Dirección Transversal $T= 1.28$ seg. (0.78 Hz), $A=3$



a).- *Periodo en Azotea*
 Dirección Longitudinal, $T= 0.40$ seg. (2.5 Hz.), $A=2$
 Figura 26. Baluarte de San Crispin, función de transferencia (15S/10)L

b).- *Periodo en Azotea*
 Dirección Transversal $T= 0.50$ seg. (2.0 Hz), $A=3$



a).- *Periodo en Azotea*
 Dirección Este-Oeste, $T= 0.33$ seg. (3.0 Hz.), $A=5$
 Figura 27. El Revellín de San José, función de transferencia (14S/10)G

b).- *Periodo en Azotea*
 Dirección Norte-Sur, $T= 0.33$ seg. (3.0 Hz), $A=3$



Baluartes

De los resultados se puede observar que los periodos de vibración en los baluartes de San Pedro, Santiago y La Soledad son semejantes, congruentes con el tipo de cimentación, estructuración, peso y altura semejantes entre sí. Sin embargo, el periodo del Baluarte de San Crispín es menor. Esto último se explica por la mayor densidad de muros de más espesor que los otros, y en él se encuentran bóvedas de cañón corrido que constituyen aljibes llenos de agua (figura 34), ocupando un gran porcentaje de su área, lo que implica también mayor peso y tiene más altura; además existe un gran macizo debajo del caballero alto de donde de su azotea parte la torre de sección redonda, por la rigidez de esta zona su periodo es menor, el cual fue medido en la base de la torre ya que por sus condiciones no fue posible instalar un equipo en la parte superior.

La torre de sección redonda del Baluarte de San Pedro se desplanta sobre un macizo de mampostería que inicia desde el nivel de piso hasta azotea siendo por lo tanto muy rígida en su base y como consecuencia de ello tiene un periodo menor que la azotea.

Revellín

La construcción tiene una forma de base triangular, estructurada con una bóveda de cañón corrido que llega a la punta de la flecha, en un lado de la flecha existen 2 aljibes (figura 34) menores y otras bóvedas cuyas paredes van perpendiculares a uno de sus lados. En otras de sus caras también tiene bóvedas cuyas paredes también están perpendiculares. Este edificio fue re-cimentado a principios de siglo, donde se le retiró parte de los sillares de apoyo de la cimentación y se suplieron con piedras de granito para mejorar la estabilidad de la construcción. Su periodo de vibración es congruente también con su altura.

Muros

Aunque se tomaron registros en la azotea de los muros en sitios centrados, las funciones de transferencia no fueron determinantes en la identificación de las frecuencias y periodos de vibrar de los mismos, por lo que será necesario tomar más registros en etapas futuras.

En la Tabla 2 se resumen de los periodos y frecuencias de los componentes estructurales de La Fortaleza.

Tabla 2. Periodos y Frecuencias de componentes estructurales

Componente Estructural	Nivel	Función de Transferencia	Componentes	Periodo seg.	Frecuencia Hz.	Amplificación A	Figura No.
Baluarte de San Pedro	Torre	(5S/1S)L	Longitudinal	0.14	7.0	15	21
			Transversal	0.13	7.2	20	
	Azotea	(8S/1S)L	Longitudinal	1.18	0.85	2	24
			Transversal	1.25	0.80	2	
Baluarte de San Crispín	Base de la Torre (caballero alto)	(9S/3S)G	Este-Oeste	0.22	4.5	3	22
			Norte-Sur	0.22	4.5	5	
	Azotea	(15S/10)L	Longitudinal	0.40	2.5	2	26
			Transversal	0.50	2.0	3	
Baluarte de Santiago	Azotea	(13S/2S)L	Longitudinal	1.28	0.78	3	23
			Transversal	1.25	0.80	3	
Baluarte de La Soledad	Azotea	(12S/4S)L	Longitudinal	1.28	0.78	3	25
			Transversal	1.28	0.78	3	
El Revellín de San José	Azotea	(14S/10)G	Este-Oeste	0.33	3.0	5	27
			Norte-Sur	0.33	3.0	3	

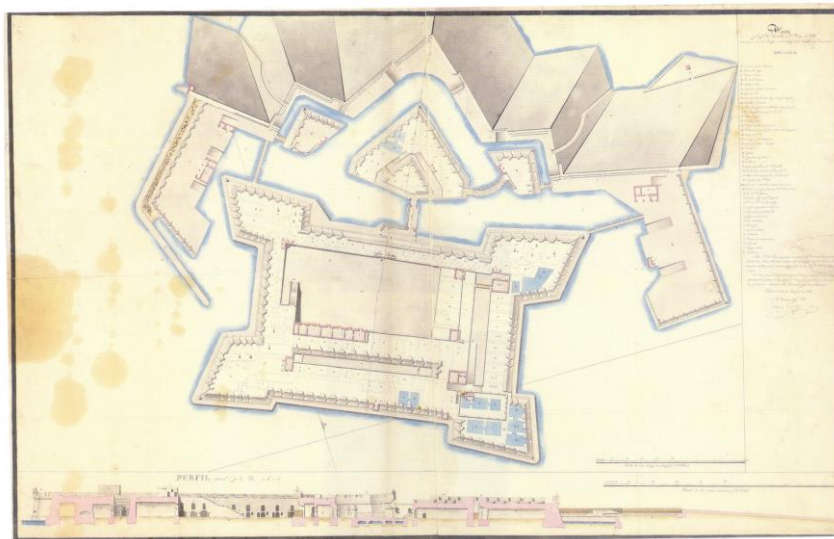


Figura 28. Distribución de aljibes dentro de La Fortaleza (cuadros azules).

SISMO DEL 16 DE AGOSTO DEL 2013

En el punto 2 (figura 16) se encontraba instalado un sismómetro de banda ancha marca Guralp cuando ocurrió el sismo (tabla 3 y figura 29). Este sismo de acuerdo a su fuente se identifica como un sismo de subducción.

Tabla 3. Características del Sismo del 13 de agosto de 2013*

Fecha	Hora Local	Latitud	Longitud	Prof. (km)	Magnitud	Zona
2013-08-13	11:50:42	16.56	-98.57	4	5.0	22 km al suroeste de Ometepec, Gro.

*Servicio Sismológico Nacional

Aplicando la Técnica de Nakamura, se evaluó nuevamente el efecto de sitio con el registro del sismo en el punto 2. La función de transferencia empírica (FTE) obtenida se muestra en la figura 30, a partir de estos resultados podemos corroborar nuevamente las ventajas de esta técnica de que con registros de vibración ambiental es posible evaluar el efecto de sitio en un sitio de interés. Interpretando la FTE de la figura 30 podemos establecer que el efecto de sitio se encuentra en un rango de 2.5 a 3 Hz, el cual ya se había determinado anteriormente con vibración ambiental.

En la figura 31 se presenta el espectro de respuesta de pseudoaceleraciones del sismo y tomando como base las FTE mostradas en las figuras 17 y 19 y las FTE para los puntos 2 y 1S (figura 20), podemos establecer que este espectro es válido para cualquier punto a nivel de piso dentro de La Fortaleza, ya que tienen el mismo efecto de sitio.

Analizando el espectro de respuesta podemos observar que los valores de las ordenadas máximas espectrales se presentan en periodos estructurales cercanos al primer modo de vibrar de los baluartes de La Fortaleza para este sismo de subducción, pero para otros sismos como intraplaca, cortical o golfo se tendrá el mismo efecto pero con una amplificación mayor dependiendo su magnitud o la distancia al epicentro ya que en este caso pueden presentarse sismos locales. Esta situación hace muy vulnerable a La Fortaleza y la pone en una situación delicada para realizar obras de refuerzo debido a que es un monumento histórico.

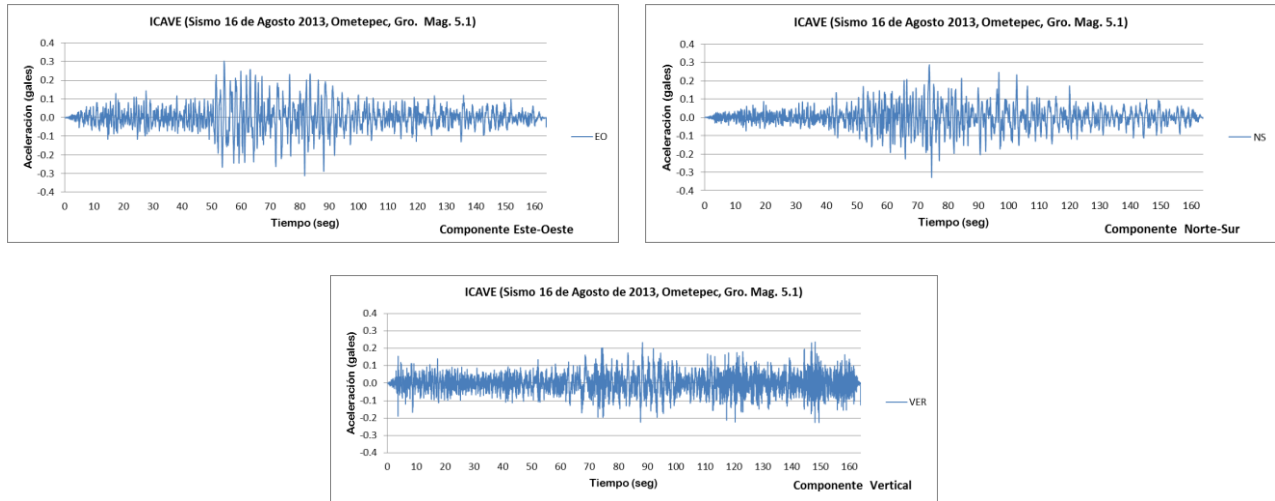


Figura 29. Sismo del 13 de agosto de 2013, registrado en el punto 2.

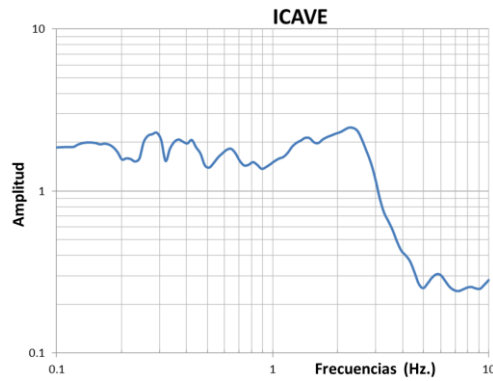


Figura 30. Función de Transferencia en el punto 2 del Sismo del 2013-08-13

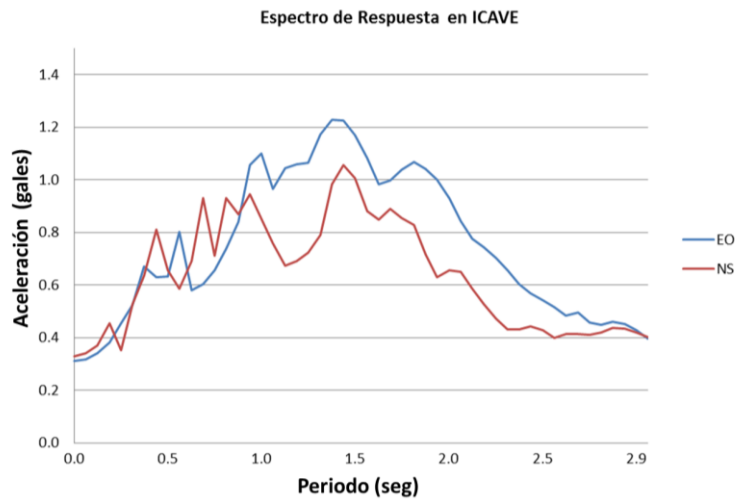


Figura 31. Espectro de respuesta sismo del 16 de agosto de 2013, punto 2.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La frecuencia natural y modos de vibrar de los distintos componentes estructurales de La Fortaleza de San Juan de Ulúa están en función de su capacidad para disipar energía, la cual depende de diversos factores como su rigidez, masa y las patologías que presentan (degradación del material, desplomes, agrietamientos y asentamientos entre otras). La rigidez está influida por las dimensiones de sus elementos estructurales, ubicación de los mismos, tipo de cimentación, características de los materiales, el proceso constructivo y evolución del componente. San Crispín por ejemplo, alberga grandes masas de agua en sus aljibes que se ubican sobre el nivel del suelo, esto aparentemente influyó también en el período. El efecto de estos parámetros no es lineal, por lo que la interpretación de los resultados resulta un tanto compleja. Otro factor determinante de las propiedades dinámicas son los daños que presenta La Fortaleza, que seguramente han modificado su respuesta dinámica a lo largo del tiempo, teoría basada en los cambios de rigidez y amortiguamiento sufridos. Esto último hace de interés el monitoreo de las vibraciones en la estructura a lo largo del tiempo, pues acompañadas de estudios complementarios no invasivos pueden ser una herramienta útil para detectar aquellos agentes generadores de vibraciones de mayor influencia en su deterioro, y de esa forma proponer acciones de protección, mantenimiento y reforzamiento más eficientes para garantizar su valiosa permanencia. Debido a que las características de las fuentes varían con el tiempo, y la contribución de cada fuente puede ser compleja para detectar, el tema representa un reto de investigación, pero que puede ser prometedor ante las dificultades de modelación numérica que deben involucrar características mecánicas de los materiales, mecánica de la fractura y fatiga entre otros elementos.

Estos trabajos corresponden a la primera etapa de un proyecto cuya finalidad es identificar la magnitud de las velocidades de partícula (VPP) originadas por vibraciones ambientales y antropogénicas del entorno de La Fortaleza, ya que este parámetro es utilizado por las normativas internacionales para evaluar el efecto de las vibraciones en la integridad estructural de los monumentos históricos. Este trabajo aporta “el cómo está” en función de sus períodos para darle seguimiento a futuro.

El espectro de respuesta del sismo del 16 de agosto puso en evidencia la coincidencia de los periodos estructurales con las ordenadas máximas de dicho espectro, por lo que es necesario mayores estudios con la finalidad de determinar un espectro de sitio para el diseño sísmico.

RECONOCIMIENTOS

A Gerardo Zamora López, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Veracruzana, campus Veracruz-Boca del Río, por su participación en el procesamiento de los registros de vibración ambiental. Al Arqueólogo José Luis Cruz Romero por proporcionarnos las facilidades para la realización de los trabajos de registros de vibración ambiental. A la empresa ICAVE por permitirnos el acceso a sus instalaciones para los registros de vibración ambiental.

REFERENCIAS

Archivo General de Indias. (A.G.I.):
Documentos referentes a las obras de San Juan de Ulúa.
A.G.I. México, 2459, 2452, 2454.
A.G.I. México, 2460.
A.G.I. México 2462
A.G.I. México, 257 Documentos referentes a Bautista Antonelli.
A.G.I. México, 60, R5,N24. Documentos referentes al Ingeniero Jaime Frank.

Archivo General de la Nación:
A.G.N. Grupo Documental Historia. Vol. 366, fojas 125-128.
Mapas Planos e Ilustraciones. (MAPILU)



Argudo Rodríguez, J. (1995), Técnicas experimentales para la determinación de las características dinámicas de estructuras y suelos, IX Jornadas de Ingeniería Estructural y Sismorresistente, Quito, Ecuador.

Calderón Quijano, José A. (1984), Fortificaciones en Nueva España, Gobierno del Estado de Veracruz, Escuela de Estudios Hispanoamericanos, Sevilla.

Carta General del Estado de Veracruz-Llave (1908), Comisión Geográfica Exploradora

Cartografía de Ultramar. (1984), Ministerio de la Defensa, Madrid

Capallera Cabada, J.F., Miranda Moreno J.A., Páez Andrade, I.M. (2012), Zonificación Geotécnica de la Zona Conurbada Veracruz, XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C.

Cien Viajeros en Veracruz 1518-1697. (1992), Tomo 1, Gobierno del Estado de Veracruz.

Corpus Urbanístico. Arquitectura Militar. Fortificaciones Costeras de México en los Archivos Españoles. (2009), Instituto Nacional de Antropología e Historia, Instituto Nacional para la Cultura y las Artes, Universidad Autónoma Metropolitana, Embajada de España en México.

Díaz del Castillo, B. (1955), Historia Verdadera de la Conquista de la Nueva España, Editorial Porrúa, S.A., México.

Finn, W. D. L. (1991), Geotechnical engineering aspects of microzonation, *Proc. Fourth Int. Conf. on Seismic Zonation, Stanford, California*, I, 199-259.

Gutiérrez, C and S K Singh (1992), A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results, *Bull. Seism. Soc. Am.* 78, 42-63.

Hernández Santana, J.R., Méndez Linares A.P., Figueroa M. (2007), Caracterización del relieve plio-cuaternario del entorno costero del Estado de Veracruz, México, *Revista C&G*, ISSN: 0214-1744

Kanai, K. and Tanaka (1954), Measurement of the microtremor, *Bull Earthquake Res Inst.*, Tokyo Univ. 32, 199-209.

Lachet, C., Bard P.Y. (1994), Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura's technique, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397.

Lermo, J., Chavez-Garcia F.J. (1994a), Are microtremors useful in site response evaluation, *Bull. Seism. Soc. Am.* 84, 1350-1364.

Lermo, J., Chavez-Garcia F.J. (1994b), Site effect evaluation at Mexico City. Dominant period and relative amplification from strong motion and microtremors records, *Soil Dyn. & Earthq. Eng.* 13, 413-423.

Müller, J. (1769), Tratado de Fortificación o Arte de Construir los Edificios Militares y Civiles, Tomo I, Barcelona.

Muñoz Espejo, F.M. (2010), El puerto de San Juan de Ulúa. Etapas de Construcción. Dentro de Fortificaciones Históricas de Veracruz. Gobierno del Estado de Veracruz. Secretaria de Educación, Veracruz.

Nakamura, Y. (1989), A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface, *QR of RTRI*, 30, No.1, 25-33.

Páez A., I. M. (2001), Características Geotécnicas y Criterios Básicos para el Diseño de Cimentaciones en la Zona Conurbada de Veracruz, Ver., Tesis Profesional, Universidad Villa Rica, Boca del Río, Ver.

Pfeffinger, Mr.(1703), Fortificaçam Moderna, ou recopilaçam de diferentes Methodos de fortificar. Lisboa.

Sánchez-Sesma F., Rodríguez M., Iturrarán-Viveros U., Luzón F., Campillo M., Margerin L., García-Jerez A., Suárez M., Santoyo M., Rodríguez-Castellanos A. (2011), A Theory for microtremor H/V spectral ratio: Application for a layered médium, *Geophysical Journal International*.

Santans y Tapia, J. (1644), Tratado de Fortificación Militar. Bruselas.

Sanz Molina, S.E. (2002), Tres Fortificaciones en Nueva España. Estudio Arquitectónico Constructivo. Tesis Doctoral Inédita. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Barcelona ETSAB, Universidad Politécnica de Cataluña Barcelona.

Williams García, R. (1998), Yo nací con la luna de plata. Historia de un puerto, Gobierno del Estado de Veracruz. Secretaria de Educación y Cultura, Veracruz.