

Proyecto de evaluación sísmica de residencia de Veredas de Yauco (Puerto Rico)

Kenneth M. Flores García
Ingeniería Civil
Ing. Manuel Coll Borgo, PE
Departamento de Ingeniería Civil
Universidad Politécnica de Puerto Rico

Abstracto — Durante el terremoto de magnitud en la 6.4 escala Richter ocurrido el 7 de enero, de 2020 en Puerto Rico, muchas estructuras residenciales en la isla fueron afectadas. Por consecuencia, se investigó y analizó una de estas estructuras tomando en cuenta códigos actuales y deficiencias por construcción. Se realizó un análisis estructural, considerando los desplazamientos, momentos, refuerzos de acero, deriva, capacidad de elementos verticales/horizontales y la cortante basal. Se determinaron y encontraron deficiencias de acero de refuerzo estructural por diseño y también deficiencias de anclajes de columnas debido a defectos de construcción que llevan a la estructura a fallar. Debido a esto, se recomienda reforzar la estructura realizando la construcción de fundaciones nuevas en secciones específicas, rehabilitación de una columna estructural, cambiar sección de una pared de bloque (CMU) por una de hormigón armado y aplicar refuerzo de fibra de carbón de ciertas secciones de paredes para llevarlas a capacidad.

Palabras clave — capacidad de acero de refuerzo verticales y horizontales, deficiencias de construcción, rehabilitación de estructuras, sismo en Puerto Rico

INTRODUCCIÓN

Debido a los efectos causados por el terremoto en Puerto Rico el 7 de enero de 2020, a las 4:24 am (08:24:25 UTC) [1], muchas estructuras en la zona suroeste y centro de la Isla se afectaron severamente. Este sismo tuvo una magnitud de 6.4 (escala Richter), localizado a 13 kilómetros del sur de Indios, con coordenadas de epicentro de 17.869N / 66.821W y con una profundidad de 9 kilómetros (figura 1). Este sismo vino como secuela de un evento de 4.7 ocurrido en diciembre 28, 2019, y otro de magnitud de 5.8 el día antes de este

evento, el 6 de enero, 2020. Los pueblos más afectados fueron Guánica, Guayanilla, Yauco, Ponce, Peñuelas y Lajas, aunque fue percibido en todos los pueblos de la isla [2].



Figura 1
Localización del sismo de 6.4 en la escala Richter

Como consecuencia del sismo, ocurrieron grandes cantidades de variaciones de fallas en estructuras. Por ejemplo, colapsaron escuelas, bajo la investigación de una posible falla estructural por el concepto de columna corta; otras estructuras sufrieron daños permanentes debido a conexiones, les fallaron los cimientos y se movieron por deslizamientos; fallaron por el concepto de columna esbelta vs. su largo; se consideran casas en zancos sin restaurar, fueron simplemente afectadas por el colapso de una estructura alledaña; sufrieron daños porque al construirse sin el aval de un Ingeniero Estructural licenciado y no estar diseñadas ni analizadas, tenían grandes deficiencias en lo construido en general; o sufrieron daños por deficiencias tanto en el diseño como en su construcción (como la que estudiamos aquí).

El caso que será parte de esta investigación es una estructura residencial que sufrió considerables daños estructurales y físicos, resumidos a continuación: grietas significativas en varias paredes, vigas y columnas de hormigón armado; demolición parcial de una columna; separación física de paredes de bloques en sus laterales y parte superior contra las paredes de hormigón y techo, respectivamente; grietas en paredes de bloques debido al efecto de columna corta; grietas en losas

del piso y del techo; y daños en la mampostería y arquitecturales (figura 2). Un Ingeniero profesional, PE, declaró la estructura como insegura y la clasificó con un rótulo rojo que notifica “No entrar u ocupar”.



Figura 2
Efectos del sismo en la estructura bajo estudio

Debido a los daños ya evidenciados, la estructura será sometida a investigación haciendo un análisis estructural, tomando en consideración los desplazamientos, momentos, refuerzos de acero, deriva, capacidad de elementos verticales y horizontales y cortante basal. Vale la pena mencionar que, a pesar de que el enfoque del estudio es uno en particular, todas las estructuras de esa sección tuvieron fallas con un patrón bastante similar. Además, se pudo observar una deficiencia por anclaje, la cual será análisis de esta investigación y se determinará si cumple con los requerimientos del código vigente.

DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

La estructura bajo estudio está localizada en la urbanización Veredas de Yauco en la Carretera PR-127, KM 0.4, Barrio Susúa Baja, Yauco, Puerto Rico. Es un Proyecto de Construcción de Veredas de Yauco, S.E. Se utilizarán los dibujos de la estructura modelo tipo 2 para el análisis correspondiente.

De los dibujos correspondientes (figura 3) y de la inspección física de la estructura se puede observar que es una estructura de dos pisos, tipo residencial, de aproximadamente 2,268 pies cuadrados de construcción con una elevación del primer piso de 8'-6" y una altura total de 18'-6". La estructura consiste de una combinación de paredes de bloques y hormigón armado, ambas con espesores aproximados de 6", y las paredes de bloques con una distribución de mortero de 32" de centro a centro. La estructura tiene sistemas de vigas, columnas, paredes, losas de piso y techo en hormigón, las cuales tienen espesores de 6" para todas las antes mencionadas, con excepción a la de piso, que tiene 5". Todos los hormigones se consideraron tipo 3000 psi.

El acero de refuerzo estructural es uno de tipo variado, el cual tiene varillas de refuerzo y además secciones con sistemas de acero tipo malla ("wires"), según especificado en los dibujos de taller y planos.

Para propósito del estudio, los elementos paredes/columnas fueron seccionados asignándoles una identificación especial a cada uno de ellos, con la nomenclatura #LL#l: número de planta: 1 o 2; letra que representa el eje: X o Y; letra que representa la descripción: W/C/B ("Wall": elementos de paredes; "Column": elementos de columnas; y "Beam": elementos de vigas), número de secuencia: 1, 2, 3, etc.: cantidad de elementos subdivididos entre W/C/B; letra que representa el lugar del estudio: "Top" (t), "Middle" (m), "Bottom" (b) y "Parapet" (p).

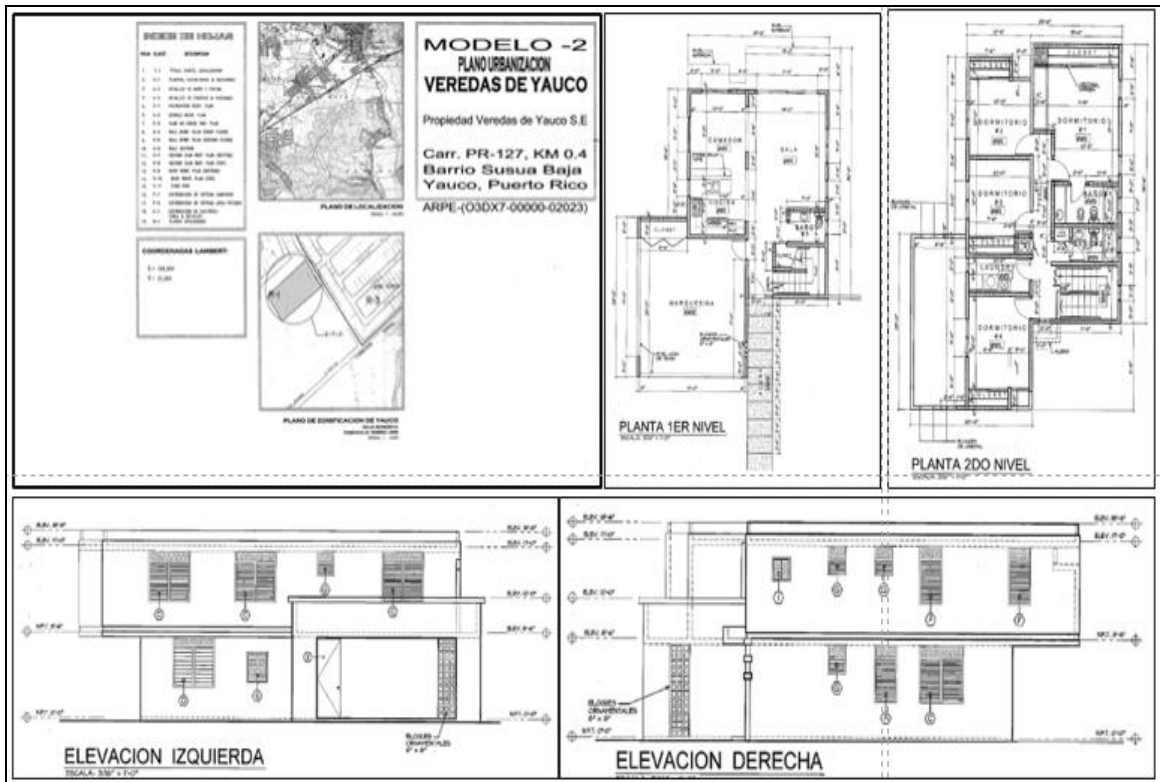


Figura 3
Plano del modelo tipo 2 de Veredas de Yauco

Se les asignaron a los elementos distintas condiciones de bordes, empotramiento o articulación, en función de los detalles de construcción y de los largos de desarrollo detallado. Esto se consideró tanto a nivel de cimentación como en el segundo nivel.

Los planos datan del 2005. Los códigos que se mencionan a continuación eran los vigentes para análisis y diseño en Puerto Rico para esta fecha:

- American Society of Civil Engineers, ASCE 7-95, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures [3]
- American Concrete Institute, ACI 318-95/ACI 318R-95, Building Code Requirements for Structural Concrete and Complementary [4]
- Uniform Building Code 1997 International Building Code [5]

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Se realizó un modelo tridimensional de la residencia bajo estudio con el programa de evaluación ETABS 16, un software integrado

utilizado para hacer análisis estructurales y diseños de edificios (figura 4).

El modelo tridimensional preparado toma en consideración todos los elementos, detalles, secciones y materiales indicados en los dibujos de construcción y dibujos de taller, y asunciones necesarias, dándole un nivel de precisión a la estructura bajo estudio (figuras 5).

Este análisis estructural se hará en dos fases:

- **Fase I:** Análisis sísmico inicial / Condición original
- **Fase II:** Evaluación sísmica para condiciones de código actual

Fase I: Análisis sísmico inicial / Condición original

Como parte de los cálculos de la fase I, se estará analizando la respuesta de la estructura ante un Análisis Estático Equivalente y Análisis Modal o Espectro de Respuesta para evaluar los siguientes parámetros: demanda sísmica, evaluación de acero de refuerzo de elementos, verificación de capacidad

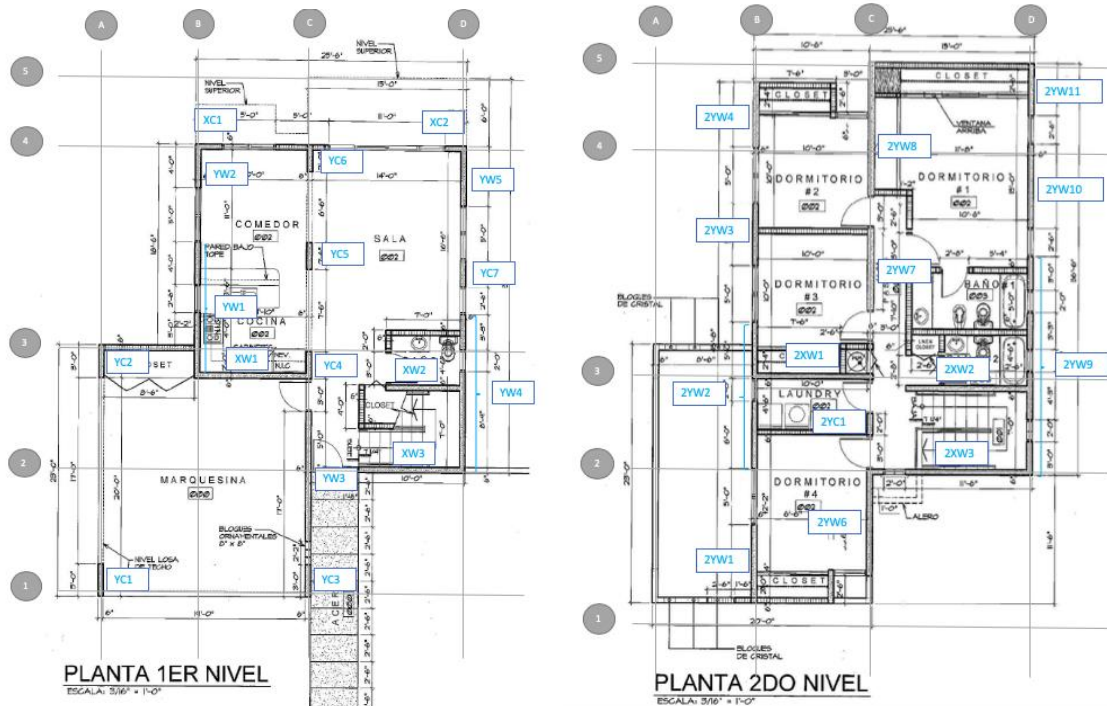


Figura 4
Modelo ETABS: identificación de paredes y columnas

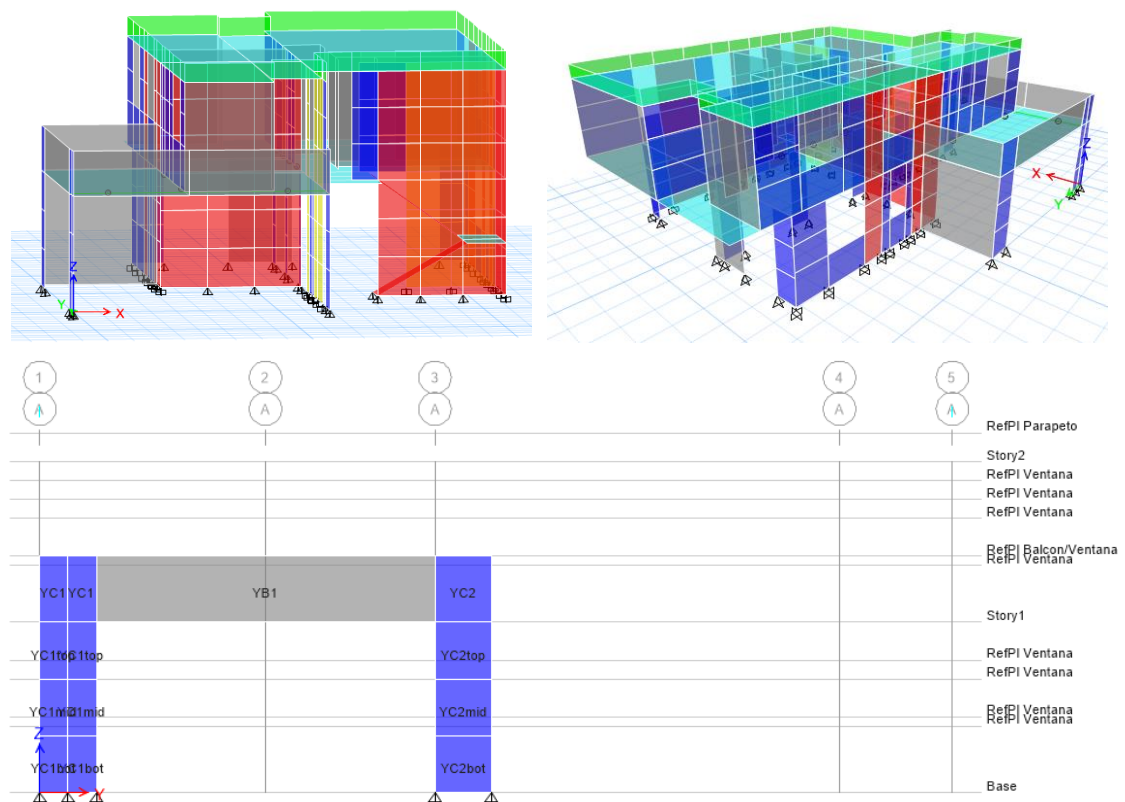


Figura 5
Modelo ETABS: secciones y elementos

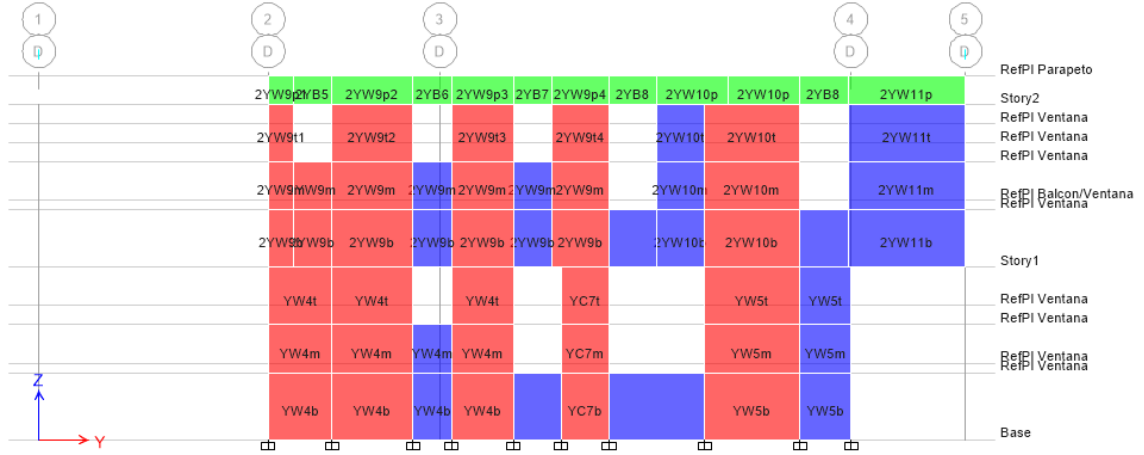
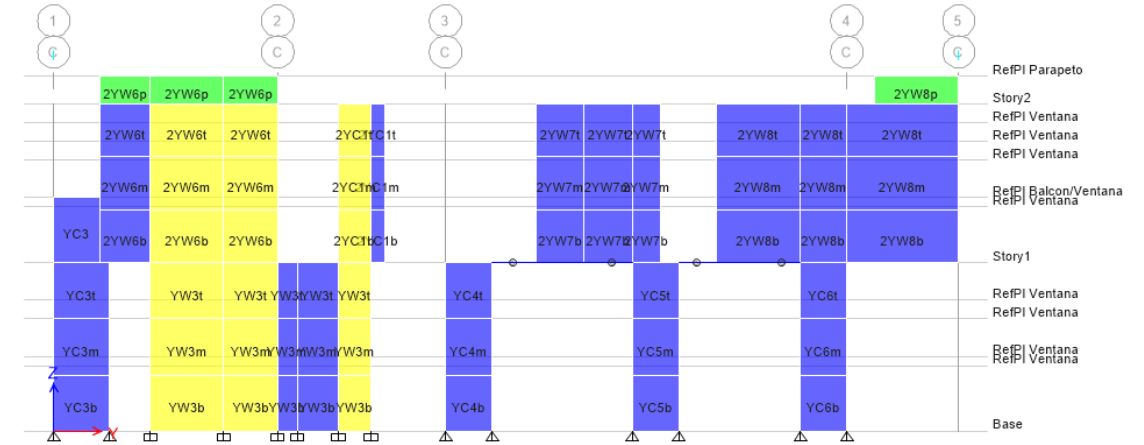
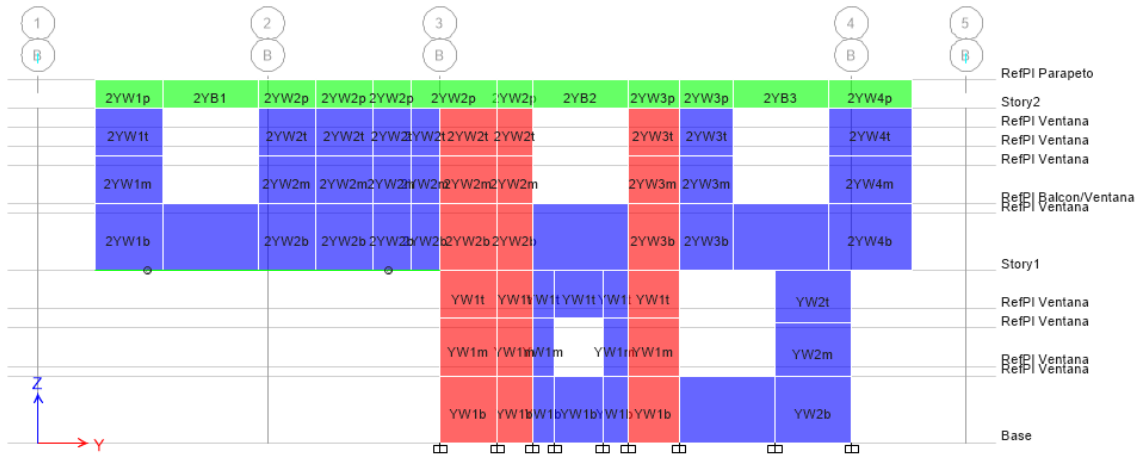


Figura 5, continuación
Modelo ETABS: secciones y elementos

en cortante de elementos verticales, evaluación de desplazamiento y derivas. Los datos obtenidos se evaluarán, compararán y verificarán entre cada uno de los métodos para ver qué efecto ejerce sobre la estructura. Las asunciones a códigos utilizadas como parte de este modelo son las siguientes:

- Los largos de desarrollo se calcularon en base al ACI 318-95, secciones 12.2.3, 12.5.2 y 12.5.3, para asignar las condiciones de borde.
- Resistencia en compresión (f'_c) del concreto: 3 ksi
- Resistencia en compresión del bloque: 1.5 ksi
- Resistencia en cedencia de varilla deformada de refuerzo: 60 ksi
- Resistencia en cedencia de malla de refuerzo: 70 ksi
- Cargas Muertas Sobreimpuestas (ASCE 7-95)
 - Techo: 30 psf
 - Pisos: 25 psf
 - Paredes: 6.25 psf o 16 psf, dependiendo de la terminación
- Cargas vivas:
 - Dormitorios (ASCE 7-95): 30 psf
 - Otras áreas, excepto balcones (ASCE 7-95): 40 psf
 - Techos (según UBC 1997, tabla 16-C): 20 psf
- Cargas Laterales (ASCE 7-95): Procedimiento de Fuerza Lateral Equivalente y Análisis Modal
- Las combinaciones de carga utilizadas en el modelo corresponden a las de ASCE 7-95, Sección 2, y los factores de reducción de capacidad corresponden a las de ACI 318-95, Sección 9.3.

El cálculo del cortante sísmico basal se realizó en base a los requisitos de ASCE 7-95, utilizando tanto el método estático como el dinámico, para evaluar la respuesta de la estructura. Para ambos casos, la magnitud de cortante es de 71.27 kips.

Se realizaron cálculos para los refuerzos verticales y horizontales en todas las secciones, para verificar la cuantía de acero de refuerzo mínima requeridas por código para cada elemento. Se pudo verificar que el 69% del acero de refuerzo

de los elementos no cumplen con la cuantía mínima vertical ni horizontal.

Se pudo observar que todos los elementos que presentaban falla a consecuencia del sismo tienen deficiencia de acero de refuerzo mínimo.

Se hizo un estudio de capacidad de cada elemento, calculando su capacidad a cortante permitida y comparada con la demanda a cortante calculada para cada condición de combinación de carga. Con el cálculo se determinó que todos los elementos cumplen con la capacidad a cortante. Además, se calculó la razón de capacidad a cortante entre lo permitido y lo obtenido por ETABS, y cabe mencionar que la sección YW1m está obteniendo una razón máxima de 0.99, que, aunque por debajo de lo permitido, está muy marginal a un fallo por capacidad. Dicha sección es una de las que tuvo deterioro y grietas después del evento sísmico.

Se puede destacar que la sección XW1b fue la que obtuvo el valor máximo a capacidad a cortante, $V_{umax}=34.41$ kips, con una razón de capacidad de 0.292. Esto demuestra que, según el diseño, esa sección tiene capacidad suficiente en cortante.

También cabe mencionar que todas las columnas, en dirección X o Y, tienen una razón a cortante pequeña, lo cual demuestra que tienen la capacidad a cortante necesaria según el diseño.

Se calcularon los desplazamientos de la estructura tanto en la dirección X como en la dirección Y. Estos se realizaron con las combinaciones de cargas de servicios, tomando como base el Código ASCE 7-95. Se obtuvo que el desplazamiento máximo en dirección X fue 0.048 y en dirección Y fue de 0.024 pulgadas.

En término de deriva, se obtuvo para el primer nivel en dirección X una magnitud de 0.025" y en Y, 0.013"; y para el segundo nivel en X, de 0.019" y en Y, de 0.022". Todos los valores mencionados están bajo los valores de deriva máximos permitidos (0.27" en el primer nivel y 0.525" en el segundo nivel). A base de estos resultados, los efectos de desplazamiento y deriva no son perjudiciales para esta estructura.

Fase II: Evaluación sísmica para condiciones de código actual

Esta fase consta de una evaluación sísmica en la que se considera la condición actual de los hallazgos encontrados de la estructura a falla durante la inspección visual realizada después del evento sísmico en cuestión. Los parámetros utilizados para evaluación fueron demanda sísmica, evaluación de acero de refuerzo de elementos, verificación de capacidad en cortante de elementos verticales, evaluación de desplazamiento y derivas.

Esta evaluación se hizo utilizando los siguientes códigos:

- American Society of Civil Engineers, ASCE 7-16, Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures [6]
- American Concrete Institute, ACI 318-14, Building Code Requirements for Structural Concrete and Complementary [7]
- American Society of Civil Engineers, ASCE 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings [8]
- Puerto Rico Building Code, PRBC 2018

En esta fase II, se tomarán aquellas asunciones a código que varían de la fase I; por consiguiente, aplicarían las mismas para esta fase:

- Cargas vivas
 - Dormitorios (ASCE 7-16): 30 psf,
 - Otras áreas, excepto balcones (ASCE 7-16): 40 psf
 - Techos (según PRBC 2018, Tabla 1607.1): 30 psf.
- Cargas Laterales (ASCE 7-16): Procedimiento de Análisis Modal según sección 12.0 código.
- Se consideró un Análisis Modal considerando los primeros 25 modos de la estructura, los cuales contribuyen a un 92.5% y 90.0% de la participación de masa modal de los ejes X y Y, respectivamente.
- Incorporación de daños en la estructura, paredes y columnas se reduce rigidez por un 40%, debido a condiciones de agrietamiento (ASCE 41-17). Elementos considerados: paredes: XW1 y YW1; columnas: YC1, YC2,

YC3 y YC4. La Columna YC2 fue considerada columna con conexión superior en fallo, la cual se considera restricción a movimiento vertical solamente (un solo grado de libertad).

El cálculo del cortante sísmico basal se realizó a base de los requisitos del ASCE 7-16, utilizando el método de Análisis Modal (dinámico) para evaluar la respuesta de la estructura, donde la magnitud del cortante es 95.43 kips.

Los resultados de la evaluación de requisitos mínimos de acero de refuerzo son iguales a los observados para la fase I, ya que los requisitos mínimos de acero entre códigos no han sufrido cambios significativos.

Similar a la fase anterior, se verificó la capacidad a cortante de los elementos verticales contra las demandas sísmicas según el ASCE 7-16. Los resultados indican que las paredes identificadas como YW1, YW2 y XW1 tenían una razón de demanda/capacidad mayor de 1.0, con magnitudes de 2.32, 1.24 y 1.10, respectivamente. Esto implica potencial de falla en cortante.

Similar a la fase anterior se calcularon los desplazamientos de la estructura, donde se obtuvo que el desplazamiento máximo en dirección X fue 0.068" y en Y fue de 0.030".

En término de deriva, se obtuvo para el primer nivel en dirección X una magnitud de 0.036" y en Y, 0.012"; y para el segundo nivel, tanto en X como en Y fue 0.028". Todos los valores mencionados están bajo los valores de deriva permitidos máximos (0.27" en el primer nivel y 0.525" en el segundo nivel). A base de estos resultados, los efectos de desplazamiento y deriva no son perjudiciales para esta estructura.

REHABILITACIÓN O REFUERZOS ESTRUCTURALES

Para poder atender el efecto causado sísmicamente por la Cortante a los elementos anteriores, fue necesario poder atender estas fallas mediante técnicas de rehabilitación y refuerzo. En esta primera corrida o iteración en ETABS, fue necesario poder configurar y cambiar una pared

existente en mampostería (CMU) por hormigón reforzado, para así poder dar una distribución de carga un poco más simétrica; se adicionó la pared XW1R, donde R significa “rehabilitación”. Además, se incrementó el largo de la columna YC2, demoliéndose completamente y convirtiéndola en la pared YW1R de hormigón, rehaciéndola desde sus cimientos y conectándola a la losa de techo con procedimientos de ingeniería aprobados, para así garantizar la transferencia de carga entre el techo y la columna. También hubo necesidad de hacer una rehabilitación a las paredes que presentaron agrietamiento, mediante inyección con epóxico a alta presión.

Tras realizar el análisis con las técnicas de rehabilitación mencionadas, se continuaron observando deficiencias en cortante en las paredes identificadas como YW1 y YW2, con una razón de demanda/capacidad de 1.41 y 1.10, respectivamente. Para poder atender esta deficiencia, se incorporaron de forma externa refuerzos con productos de fibra de carbón, ya establecido en la industria para rehabilitaciones. Como resultado, se logró el cumplimiento de capacidad en cortante para todos los elementos estructurales según los requisitos sísmicos del ASCE 7-16 (figura 6).

CONCLUSIONES

Como parte de los procesos de investigación, análisis y recomendación sobre el estudio de rehabilitación de una estructura existente en el área de Yauco, Puerto Rico, localizada en la urbanización Veredas de Yauco, se han realizado los cálculos necesarios utilizando los códigos vigentes a la fecha de construcción y los actuales para análisis y diseño estructural de Puerto Rico. Estos cálculos han reflejado que la estructura en estudio, bajo el código actual, para el cual no fue diseñado, consta de varias deficiencias que deben atenderse para así poder hacer que dicha estructura esté en cumplimiento y evitar que pueda ser afectada en un futuro por algún evento sísmico.

Cabe mencionar que la actualización del código de diseño de la fase I a la fase II ya tiene un impacto significativo, el cual se puede resumir en términos porcentuales de la siguiente manera: se adiciona un 34% de incremento en el efecto de cortante basal y se incrementa por un 30% el efecto de las cargas sísmicas en conjunto con los requisitos de redundancia de este código. Esto significa que, ya conociendo este estado, existía una posibilidad de fallas de elementos, como lo reflejaron sus cálculos.

De los resultados de la evaluación del acero de refuerzo vertical y horizontal para los elementos verticales (para ambos códigos), más de la mitad de los elementos no cumplen con la cuantía mínima. Aunque se demostró que los elementos tenían capacidad para la fase I, la falta de cuantía mínima, con énfasis en el acero horizontal, puede resultar en agrietamiento por cargas en cortantes.

Tras la evaluación de la capacidad en cortante de los elementos verticales ante las demandas sísmicas, para la fase I se observó que cuantitativamente todos los elementos cumplían. No obstante, la pared con la razón demanda/capacidad más alta se pudo haber comprometido como consecuencia del fallo de la columna identificada como YC2, cuyo fallo está relacionado a deficiencias de construcción. Para el caso de la fase II, bajo las condiciones actuales de daño, observamos varios elementos verticales que tienen posibilidad de falla, lo que activa la necesidad de medidas de rehabilitación, ya que la estructura se podría ver comprometida si ocurriera otro evento sísmico.

Como parte de los sistemas de rehabilitación, fue necesario hacer una combinación de varias técnicas para así poder llegar a la solución final de cumplimiento. Se consideró poder hacer una restauración de los elementos agrietados, utilizando inyecciones con productos epóxicos de alta viscosidad para restaurar la integridad y la rigidez de los elementos afectados, para que estos fuesen elementos en condiciones óptimas y pudiesen tener una transferencia a carga según lo esperado. Estos

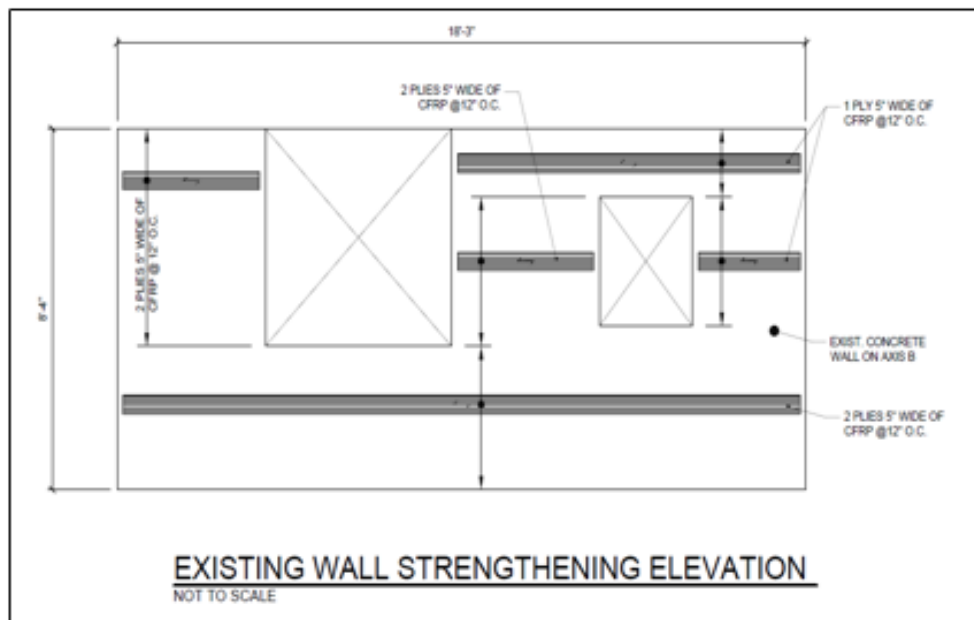
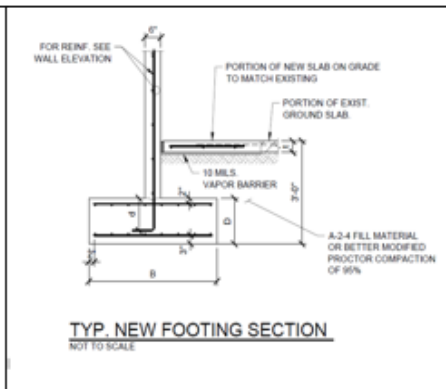
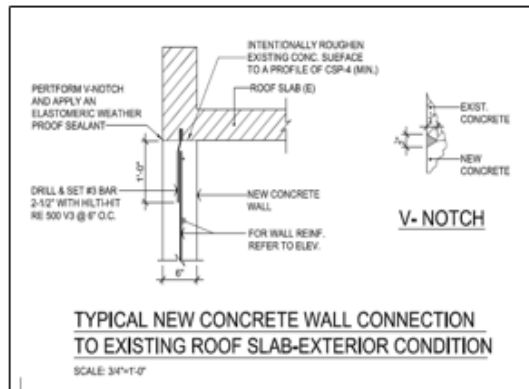
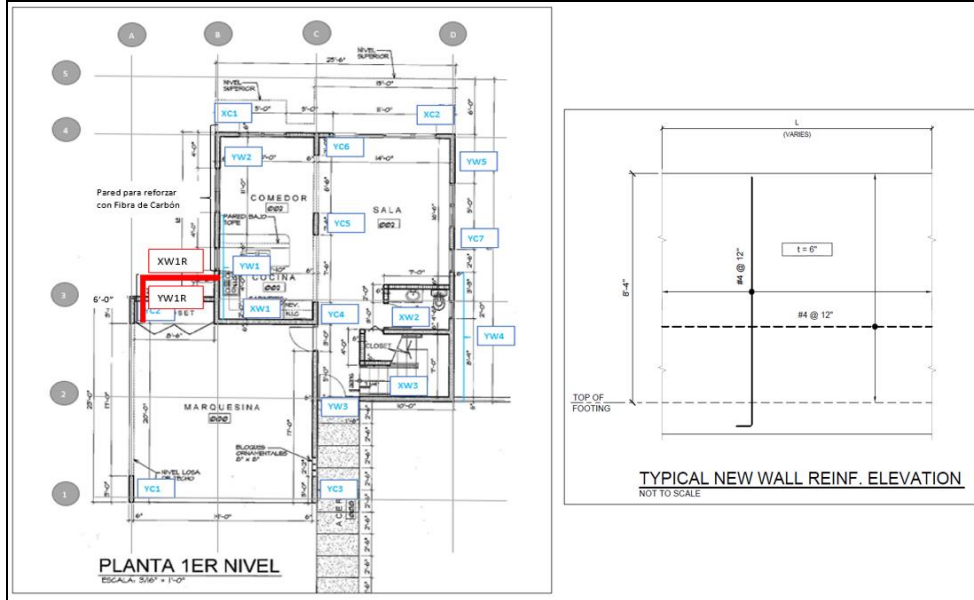


Figura 6
Rehabilitaciones recomendadas a la estructura

productos son típicamente utilizados en la industria y deben ser aplicados bajo las recomendaciones del fabricante para que así alcancen el grado de optimización necesario y requerido como resultado de este estudio. Además de la rehabilitación de grietas, será necesario poder remplazar varios elementos afectados. Para esta demolición, se requerirá un buen apuntalamiento previo a la ejecución. Además, se requiere demolición de cimientos y una preparación de losas de piso y techo apropiada. Esto debe ser ejecutado por un personal competente, con vasto conocimiento en rehabilitación e ingeniería y que procure por los mejores productos en el mercado para realizarla. Esto conlleva productos epóxicos para anclar el acero estructural de refuerzo apropiadamente a las losas existentes. Y además se requerirá reforzar varias paredes con productos aplicables de fibra de carbón, siguiendo, además del detalle, las recomendaciones técnicas del fabricante.

REFERENCIAS

- [1] “Un terremoto de magnitud 6.4 sacude a Puerto Rico en la madrugada del martes”, *El Nuevo Día*, 7 de enero, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.elnuevodia.com/noticias/locales/nota/un-terremoto-de-magnitud-6.4-sacude-a-puerto-rico-en-la-madrugada-del-martes-2539152/>
- [2] USGS, “Magnitude 6.4 earthquake in Puerto Rico”, 29 de enero, 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.usgs.gov/news/magnitude-6.4-earthquake-puerto-rico>
- [3] *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, ASCE 7-95, 1996.
- [4] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Complementary*, ACI 318-95/ACI 318R-95, 2017.
- [5] *Uniform Building Code*, 1997.
- [6] *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, ASCE 7-16, 2017.
- [7] *Building Code Requirements for Structural Concrete and Complementary*, ACI-318-14, 2017.
- [8] *Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*, ASCE 41-17, 2017.