

# Proceso de diseño sismorresistente de edificios de viviendas de mampostería reforzada para zonas de alta peligrosidad sísmica

## *Earthquake resistant design process for residential buildings with reinforced masonry for zones of high seismic hazard*

Eduardo Rafael Álvarez Deulofeu<sup>(\*)</sup>, Fidel Lora Alonso<sup>(\*\*)</sup>, Samary López Chang<sup>(\*\*\*)</sup>

### RESUMEN

Se presenta un proceso de diseño sismorresistente de edificios de mampostería reforzada, como una opción para contribuir al programa de la vivienda social en la ciudad de Santiago de Cuba, ubicada en la zona de mayor peligrosidad sísmica de Cuba y con un significativo déficit habitacional. Este proceso de diseño, basado en métodos estáticos y dinámicos clásicos, utilizando normas de construcción sismorresistente de Cuba, México, Colombia y los Estados Unidos y un informe del Applied Technology Council (ATC), permitió hacer una propuesta de un edificio de tres plantas, de muros de mampostería reforzada de bloques huecos de hormigón conectados por vigas de hormigón armado y confinados por castillos interiores y columnas de hormigón armado. Aparece una valoración técnico-económica, comparando con un edificio sismorresistente de pórticos espaciales dúctiles, exponiendo las ventajas y desventajas de ambas opciones constructivas. Este proyecto puede generalizarse en países del Caribe con sismicidad similar a Cuba.

**Palabras clave:** mampostería reforzada; diseño sismorresistente; edificios de viviendas; método de análisis lineal en el tiempo; análisis estático no lineal.

### ABSTRACT

*An earthquake-resistant design process for reinforced masonry buildings is presented as an option to contribute to the social housing program in the city of Santiago de Cuba, located at the zone of greatest seismic hazard of Cuba and with a significant housing deficit. This design process, based on classical static and dynamic methods, using earthquake resistant construction standards from Cuba, Mexico, Colombia and the United States and a report from the Applied Technology Council (ATC), allowed to make a proposal for a three-story building, of reinforced masonry walls of hollow concrete blocks connected by reinforced concrete beams and confined by interior castles and reinforced concrete columns. A technician-economic valuation appears, comparing it with an earthquake resistant building with ductile space frames, exposing the advantages and disadvantages of both construction options. This project and can be generalized in Caribbean countries with seismicity similar to Cuba.*

**Keywords:** reinforced masonry, earthquake-resistant design, residential buildings, time linear analysis method, static nonlinear analysis.

(\*) Doctor en Ciencias. Ingeniero Civil. Universidad Oriente. Santiago de Cuba (Cuba).

(\*\*) Master en Ciencias. Ingeniero Civil. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. Santiago de Cuba (Cuba).

(\*\*\*) Ingeniera Civil. Empresa de Proyectos 15. Santiago de Cuba (Cuba).

Persona de contacto: [ealvarez.deulofeu@gmail.com](mailto:ealvarez.deulofeu@gmail.com) (E.R. Álvarez Deulofeu)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1819-263X> (E.R. Álvarez Deulofeu); <https://orcid.org/0000-0003-3288-7833> (F. A. Lora Alonso); <https://orcid.org/0000-0003-0622-8324> (S. López Chang).

**Cómo citar este artículo/Citation:** Eduardo Rafael Álvarez Deulofeu, Fidel Lora Alonso, Samay López Chang (2022). Proceso de diseño sismorresistente de edificios de viviendas de mampostería reforzada para zonas de alta peligrosidad sísmica. *Informes de la Construcción*, 74(566): e445. <https://doi.org/10.3989/ic.85554>

**Copyright:** © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 25/10/2020  
Aceptado/Accepted: 23/09/2021  
Publicado on-line/Published on-line: 21/06/2022

## 1. INTRODUCCIÓN

El buen comportamiento sísmico de la mampostería correctamente reforzada y construida en Nueva Zelanda, Chile, Perú y México han dado un fuerte impulso a la investigación, a la determinación de configuraciones estructurales y a métodos de análisis, diseño y dimensionamiento cada vez más racionales, que la hacen competitiva económicamente con otras formas y materiales estructurales (1). Específicamente la mampostería hueca reforzada alcanza un comportamiento sísmico comparable al de los muros estructurales de concreto reforzado, si se tienen prácticas bien establecidas para su eficiente y confiable construcción, lo que a su vez ha limitado su uso en países en vías de desarrollo (2). Antecedentes esenciales para su desarrollo fueron el surgimiento del proceso industrial de fabricación de bloques de hormigón huecos a principios del siglo XX en los Estados Unidos y la publicación en ese país del primer código de ingeniería para mampostería en 1966, esencial para el desarrollo de buenas prácticas para el diseño y construcción con mampostería.

Contribuciones importantes al diseño sismorresistente de la mampostería tienen lugar en los Estados Unidos y en Nueva Zelanda a finales del siglo XX. En esa época aparecen importantes publicaciones relacionadas a la mampostería hueca reforzada de bloques de concreto, que se resumen en (3). Así Paulay y Priestley en 1992 (4) en Nueva Zelanda, basado en sus investigaciones y recopilando investigaciones de otros autores, establecen los principios prácticos del diseño sismorresistente de la mampostería hueca reforzada, apareciendo la filosofía del diseño por capacidad y con ello la mampostería dúctil. En este período, en Europa, son importantes las contribuciones de Tomazevic (3) para la elaboración del Eurocode. Alcocer y Klingner en (2) resumen el uso de la mampostería en el continente americano, caracterizado por disímiles técnicas constructivas y utilizándose con éxito en edificios de viviendas multifamiliares de altura media (hasta 5 ó 6 pisos) de muros de 120 a 240 mm de espesor, de mampostería confinada o con refuerzo interior, diseñados y construidos atendiendo a normas propias que recopilan las investigaciones y experiencias acumuladas. Cano en (5) presenta una revisión excelente del comportamiento ante cargas sísmicas de la mampostería reforzada de bloques de concreto. Banting en (6) resume la evolución de las normas sísmicas en relación al diseño y evaluación del desempeño de la mampostería reforzada. Actualmente continúan las investigaciones de la mampostería reforzada para una mejor comprensión de su desempeño sísmico estructural, basado en la modelación numérica (7, 8) aparejado con los avances tecnológicos de la computación y de los laboratorios de materiales (9, 10). Investigaciones recientes realizadas por Hasan, M. et al. (11) confirman el buen comportamiento sísmico de la mampostería hueca reforzada, apuntando las tendencias actuales al uso de la tecnología del pretensado (12), así como el uso de la fibra de carbono para aumentar su capacidad ante cargas laterales (13).

La mampostería hueca reforzada de bloques de concreto ha estado muy vinculada a la solución del problema de la vivienda social. En Cuba, a pesar de los logros alcanzados, el problema de la vivienda es uno de los más acuciantes del país (14). Según el inventario nacional el fondo habitacional del país, al cierre de diciembre de 2020 era de 3 946 747 viviendas, de ellas 1 452 852 (37%) se califica de regular y malo. Según el programa nacional de la vivienda y el hábitat

(15), el déficit habitacional asciende a 862 879 viviendas, nuevas a construir 527 mil 575, estimándose recuperar este déficit en 10 años con acciones constructivas por la vía de esfuerzo propio (60%) y por la estatal (40%). En el caso de la ciudad de Santiago de Cuba, ubicada en la zona de mayor peligrosidad sísmica de Cuba, con un agravamiento de su déficit habitacional en el 2012 debido al huracán Sandy y que ascendió a 101 mil 202 viviendas para la provincia de Santiago de Cuba (15), se exigen de soluciones constructivas que mitiguen riesgos a estos desastres naturales y que sean sustentables económicamente. Las alternativas para construir viviendas sociales en esta ciudad son insuficientes, prevaleciendo en el sector privado técnicas constructivas convencionales sin atender en muchos casos a las reglas especiales para zonas de alta sismicidad y en el sector estatal sistemas constructivos de alto costo y consumo energético. La situación de la vivienda en América Latina y el Caribe, según la CEPAL (16), es también compleja, y urge de programas de construcción de viviendas que reduzcan el déficit habitacional.

Esta problemática justifica la introducción de la mampostería reforzada como opción para la construcción sustentable de viviendas sismorresistentes en la ciudad de Santiago de Cuba, limitada por la ausencia en el país de normas sismorresistentes para esta técnica constructiva. Las normas para el diseño y construcción de estructuras de mampostería contienen requisitos mínimos para su análisis, diseño y construcción (17-21). En países de alta sismicidad se exigen reglas especiales para su construcción vinculadas a los materiales, detallado constructivo, y otras vinculadas al desempeño sísmico como la regularidad en planta y elevación y el régimen de trabajo de los muros de mampostería reforzada (22-24). Estas estructuras tienen un nivel de seguridad comparable a las estructuras de otros materiales (17, 18), cuando se diseñan y construyen de acuerdo a las normativas ya mencionadas, aunque su crecimiento en altura es limitado.

En este artículo aparece un proceso de diseño sismorresistente de edificios de mampostería reforzada basado en la modelación en elementos finitos y el uso de los métodos clásicos de la dinámica estructural, que aportan testimonios diferentes del comportamiento sísmico. Así la evaluación del diseño estructural será más completa cuando se estudian opciones constructivas que implican estudio de variantes de edificios para evaluar crecimiento en altura. Resulta novedoso que el diseño sismorresistente no ocurre de forma directa, haciéndose una revisión estructural para las cuantías de refuerzo límites especificadas en normas de referencia internacional con vistas a discriminar variantes en cuanto al crecimiento en altura. Es por ello que este proceso de diseño implica una racionalización posterior del acero para ofrecer variantes racionales económicamente sustentables. La aplicación de este proceso de diseño permitió ofrecer, para la ciudad de Santiago de Cuba, un proyecto sismorresistente para construir edificios de viviendas de 3 pisos de mampostería reforzada de bloques huecos de hormigón con castillos interiores. Los muros se conjugan con elementos de hormigón armado, como las vigas que los conectan, columnas de confinamiento que definen la modulación de la planta de arquitectura y un muro central longitudinal al cual se conectan las losas de escalera. Este resultado impactará positivamente en lo social dando respuesta al programa de la vivienda en el territorio. La valoración técnico-económica de este proyecto demuestra que es económicamente sustentable y para el contexto cuba-

no actual muestra indicadores mucho más bajos que aquellos de los sistemas constructivos utilizados para construir edificios de viviendas similares, sobretodo por su bajo consumo energético por ser una técnica artesanal. Por los datos de la sismicidad histórica de la región puede ser generalizado a otros países del Caribe como Jamaica, Haití, República Dominicana.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Metodología de la investigación

Se aplica un procedimiento que resuelve los pasos siguientes:

1. Caracterizar la peligrosidad sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba.
2. Caracterizar la mampostería reforzada como tipología constructiva y su uso en zonas peligro sísmico.
3. Definir las formulaciones para el diseño de los muros de mampostería reforzada, las vigas de acople y los muros de escalera de hormigón armado.
4. Modelación estructural de las variantes en estudio.
5. Obtener las solicitaciones de cálculo en los muros de mampostería reforzada, vigas de acople y muros de soporte de escalera de hormigón armado.
6. Diseño estructural de cada uno de los elementos de las variantes generadas.
7. Evaluación del diseño estructural de las variantes generadas para seleccionar la variante a construir.
8. Racionalizar el acero de la variante aprobada.
9. Corroborar el diseño estructural de la variante racionalizada utilizando el método de análisis lineal en el tiempo.
10. Evaluar el desempeño de la variante racionalizada aplicando el análisis estático no lineal (pushover).
11. Valoración técnico-económica de la variante racionalizada.

Se asume que al disponer de un procedimiento basado en modelación en elementos finitos (SAP 2000 Version 19.2.1) se alcanza mayor precisión en el cálculo de los esfuerzos interiores y desplazamientos laterales de la edificación. Esto permitirá un diseño sismorresistente más racional en relación a procedimientos más conservadores basados en modelos simplificados. Las solicitaciones ofrecidas por el SAP 2000, para “section cuts” previamente introducidas al modelo estructural, permiten chequear los muros de mampostería reforzada y vigas de acople de hormigón armado por fórmulas especificadas en normas de referencia internacional (17, 18, 25). Las cargas sísmicas se obtienen del *Método Estático Equivalente* y *Método de Espectro de Respuesta* por la norma sísmica cubana (26), considerando un comportamiento cuasi-elástico y las excentricidades accidentales de los centros de masas respecto a los centros de rigideces de los pisos. La evaluación del diseño estructural de las variantes, para las cuantías de refuerzo límites especificadas, confirma aquella a construir, racionalizándose el acero para lograr un proyecto económicamente sustentable. Se corroboran los resultados por el *Método de Análisis Lineal en el Tiempo* utilizando acelerogramas espectro-compatibles escalados a partir de un sismo débil registrado en la ciudad de Santiago de Cuba. La evaluación del desempeño de la variante racionalizada se obtiene del Análisis Estático no Lineal Pushover. Por último se hace una valoración técnico-económica basada en costos directos de construcción comparando con un edificio sismorresistente de pórticos dúctiles con igual modulación en planta e iguales puntales.

### 2.2. Peligrosidad sísmica de la ciudad de Santiago de Cuba

Cuba está ubicada en el borde sureste de la placa de Norteamérica, limitando con el norte de la placa del Caribe, donde se ubica la ciudad de Santiago de Cuba en contacto con la microplaca de Gonave (27) y por su cercanía a la falla Oriente, presenta la mayor sismicidad del país. Esta falla es la zona sísmogénica más activa de Cuba; donde se reportan el 85% de los 28 sismos fuertes ocurridos en la isla, 20 de ellos al sur de la provincia de Santiago de Cuba (28). Los más recientes se reportan en 1932 ( $M_s=6,75$ ;  $I=8,0$ ) y 1947 ( $M_s=6,75$ ;  $I=7,0$ ) en la ciudad de Santiago de Cuba, y 1976 ( $M_s=5,7$ ;  $I=8,0$ ) y 1992 ( $M_s=7,0$ ;  $I=7,0$ ) al sur de la provincia Granma, también en el sureste de la región oriental (28). Investigaciones sísmológicas del Caribe Norte (29) estiman una magnitud máxima  $M_s=8.2$  para esta zona. Investigaciones recientes (30) confirman lo anterior y estiman magnitudes máximas  $M_w$  similares para la ciudad de Santiago de Cuba, Jamaica, Norte de Haití y el Norte y el Centro de la República Dominicana.

Los sismos de diseño para la ciudad de Santiago de Cuba se definen como espectros de diseño elásticos (5% del amortiguamiento crítico) obtenidos a partir de las aceleraciones espectrales máximas de la componente horizontal en roca, ofrecidas por García (31), y que se resumen en el mapa de zonificación sísmica de la norma sísmica cubana (Figura 1). En este mapa aparecen, por municipios, las aceleraciones espectrales para periodos cortos  $S_s$  (0,2s) y largos  $S_1$  (1,0s), obtenidas para una probabilidad de excedencia del 3% y 50 años de vida útil lo que se corresponde con un periodo de retorno de 1642 años “Sismo Extremo”, según (32). Los valores de  $S_s$  y  $S_1$  se ajustan por los efectos de sitio de acuerdo al suelo que sustenta la edificación. Por último usando un factor de escala para el nivel de diseño exigido de acuerdo a la importancia de la obra, se obtienen espectros de diseño elásticos para el “Sismo Severo”, “Sismo Ordinario” y “Sismo Mínimo” con probabilidades de excedencia de 5, 10 y 20% respectivamente, que se relacionan con periodos de retorno de 808, 475 y 225 años para el periodo de vida útil de la edificación fijado en 50 años.

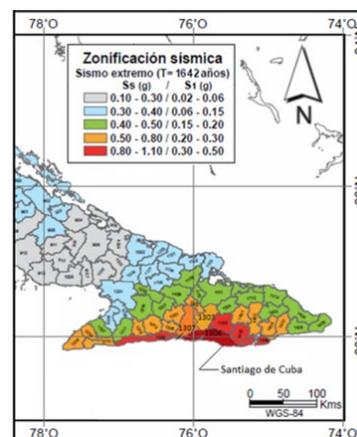


Figura 1. Mapa de zonificación sísmica de la región oriental de la República de Cuba según la norma sísmica cubana (26), basado en las aceleraciones espectrales máximas de la componente horizontal en roca (5% del amortiguamiento crítico) para un “Sismo Extremo”.

$S_s$ : Aceleración espectral para periodo corto (0,2s).

$S_1$ : Aceleración espectral para periodo largo (1,0s).

### 2.3. Selección de piezas y/o material del muro

Para la selección de piezas y/o material del muro se considerarán las regulaciones de la norma mexicana para el diseño y construcción de estructuras de mampostería (17). Esta normativa para bloques de concreto de 20 cm de espesor y 50 cm de largo, establece una resistencia de diseño a compresión bruta mínima de 10 MPa. Esto asegura en caso que no se realicen ensayos de los muros, que para morteros de pega Tipo I con resistencia mínima a compresión de 12,5 MPa se alcance una resistencia a compresión del muro de al menos 5 MPa a partir de la resistencia de diseño de las piezas y el mortero obtenidas de determinaciones experimentales. La resistencia a compresión del muro para el mismo tipo de mortero de pega es mucho menor (2 MPa) en caso que no se realicen estas últimas determinaciones experimentales. Esto refiere que en la construcción de muros de mampostería reforzada en zonas sísmicas, la realización de determinaciones experimentales

no solo sería necesaria para garantizar un buen desempeño estructural del muro sino también que de no realizarse tendría serias implicaciones económicas y limitaría el crecimiento en altura de los edificios. Esto último se demostró en investigaciones hechas anteriormente (33), donde para la Ciudad de Santiago de Cuba prácticamente no era posible crecer en altura, debido esencialmente a las altas tensiones tangenciales de los muros, cuyas zonas críticas previamente fueron demostradas en (34). La resistencia a compresión diagonal del muro, es también penalizada por la normativa mexicana de no realizarse ensayos a estos esfuerzos, fijando un valor máximo de 0,35 MPa para muros construidos con morteros de pega Tipo I. La norma colombiana (18) aporta una fórmula basada en ensayos que estima el aumento de la resistencia a compresión del muro a partir de la calidad del mortero de relleno (15 MPa), el cual no deberá ser inferior a la del mortero de pega. Esto permite asumir que la resistencia a compresión del muro fijada en 5 MPa se incrementará hasta 7 MPa. Las resistencias de los materiales de construcción utilizados en el proyecto se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Materiales de construcción.

Acero de refuerzo	
Acero cubano G-40	$f_y = 300$ MPa
Elementos de hormigón armado	
Losas de pisos y cubierta, losas de escalera, muro soporte de escalera, vigas de cerramiento, columnas	$f'_c = 30$ MPa
Muros de mampostería reforzada	
Bloques huecos de hormigón	$f'_p = 10$ MPa
Mortero de pega (Tipo I)	$f'_j = 12,5$ MPa
Hormigón de relleno	$f'_j = 15$ MPa

$f_y$ : Esfuerzo de fluencia especificado del acero de refuerzo  
 $f'_c$ : Resistencia especificada del concreto en compresión  
 $f'_p$ : Resistencia de diseño a compresión de las piezas para el área bruta  
 $f'_j$ : Resistencia de diseño a compresión del mortero o de cilindros de concreto de relleno

### 2.4. Generación de las variantes de edificios

Se concibe un proyecto arquitectónico de edificios de viviendas de tres a cuatro pisos de mampostería reforzada interiormente, no variando la planta arquitectónica (Figura 2a), su función, las dimensiones de los elementos estructurales, el tipo y calidad de los materiales de construcción. Se hacen modificaciones en relación al crecimiento vertical resultando el parámetro variable seleccionado y el que determina las variantes de edificios.

#### 2.4.1. Modelo de la estructura

Modelo espacial en elementos finitos, que asume un comportamiento elástico-lineal, considerando para el análisis dinámico un modelo multimasas (Figura 2b). Se asume, para todos los elementos estructurales, elementos finitos "shell" con comportamiento membranal y de flexión como placas delga-

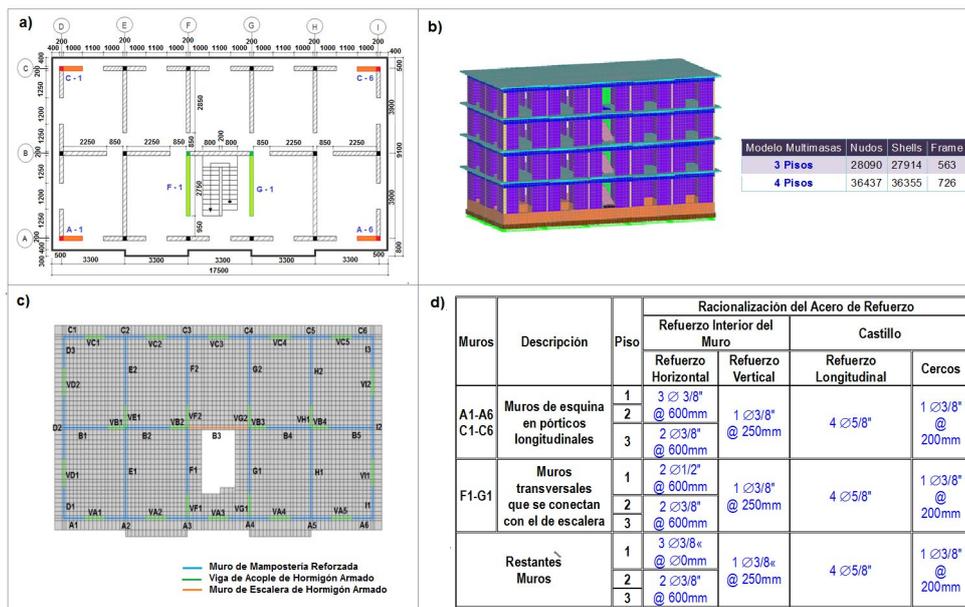


Figura 2. Variante de edificio de viviendas de mampostería reforzada de 3 pisos.

a) Planta arquitectónica, b) Modelo estructural, c) Elementos estructurales, d) Racionalización del acero de refuerzo del edificio de tres pisos.

das. Para el diseño sismorresistente de la mampostería reforzada, según NEHRP (35) sustentado en (36), los elementos finitos "shell" son ideales para considerar las deformaciones a flexión y cortante, evaluando simultáneamente el comportamiento en el plano y ortogonal al plano del muro. En este trabajo, utilizando el SAP 2000 version 19.2.1 (37) se elabora una malla muy refinada con elementos finitos rectangulares con la mayor dimensión menor de 1m y mucho menor que 10 veces el espesor de los muros y con relación de forma menor que 5, que cumple con lo especificado en la literatura clásica (38). Las losas, vigas, columnas y muros son discretizadas tal que se conectan siempre a través de los nudos de sus elementos finitos reduciendo los errores del cálculo numérico. Se evaluaron inicialmente dos mallas con vistas a garantizar una solución numéricamente estable monitoreando los desplazamientos laterales de cada uno de los pisos, aceptando aquella de menor gasto computacional. Los elementos finitos de todos los muros poseen un espesor igual sus espesores reales (17) y se asignan a ellos sus propiedades mecánicas y modificadores de rigidez a flexión (23, 24, 39). Esto permite asumir una rigidez efectiva, que considera el grado de fisuración y de acción inelástica inmediatamente antes de la fluencia.

La rigidez efectiva especificada para el diseño sismorresistente de muros a cortante de mampostería, según el Eurocode 8 (23), es actualmente uno de los requerimientos más polémicos y aún no satisfactoriamente resuelto. En general, la respuesta de los muros de mampostería sometidos a altas solicitaciones cíclicas de cortantes es no lineal y depende de muchos parámetros, alcanzándose durante los ciclos de cargas no solo reducciones de la rigidez sino también de la resistencia (40). La estimación de la rigidez efectiva, según el FEMA 273, depende de los esfuerzos axiales y cortantes que puedan ocurrir simultáneamente en el muro. En el caso particular de altas solicitaciones sísmicas debe asumirse una sección fisurada, lo cual justifica la modificación de la rigidez elástica inicial del muro utilizando modificadores de rigidez a flexión. Según el Eurocode 8 para cálculos computacionales basados en modelos lineales, para considerar el grado de fisuración y de acción inelástica que ocurre en los elementos inmediatamente antes de la fluencia, se recomienda primeramente estimar la rigidez elástica considerando las deformaciones a cortante del muro, aplicando adicionalmente un modificador de la rigidez a flexión de 0,5. Este valor, asignado en este trabajo a los muros de mampostería, es inferior al modificador de rigidez a flexión de 0,7 utilizado para los muros de hormigón armado, propuesto por el ACI 318-2019 y el FEMA 273. Según la norma de mampostería mexicana, si se usan modelos en elementos finitos, sus espesores pueden ser considerados igual al espesor real del muro, para el caso de mampostería hueca de bloques de hormigón con todas sus celdas rellenas. La rigidez efectiva de los muros de mampostería reforzada depende también de la forma de estimación de sus propiedades mecánicas, muy inferiores a las del hormigón, por lo que muros de hormigón armado similares a los de mampostería reforzada mostrarán rigideces efectivas significativamente mayores independientemente del refuerzo dispuesto en los muros de mampostería.

#### 2.4.2. Modelación de las cargas sísmicas

Se modelan las cargas sísmicas por los métodos de cálculo especificados en la norma sísmica cubana NC 46:2017, considerando las tres componentes principales del sismo, dos

componentes horizontales y la otra vertical, siempre combinando el 100% de la carga sísmica en una de las direcciones principales, simultáneamente con el 30% en las restantes direcciones. La carga sísmica vertical por el *Método Estático Equivalente*, según la NC 46:2017, se modela como un incremento de la carga permanente total en un 20% de su valor por la aceleración de respuesta para período corto según el espectro de diseño para el perfil de suelo considerado. Las combinaciones de cargas son las referidas por la norma sísmica cubana, definidas a partir de las cargas gravitatorias especificadas para la vivienda y las cargas sísmicas para la acción simultánea del sismo en las tres direcciones principales del edificio. Para el *Método Estático Equivalente* se considera la inversión de las cargas sísmicas en cada uno de los centros de masas de los pisos.

### 2.5. Evaluación del diseño de las variantes de edificios de mampostería reforzada

La evaluación de las variantes se iniciará con el análisis de la planta de arquitectura. Se exigen plantas regulares, homogéneas, de formas simples y simétricas, con muros estructurales en ambas direcciones, confinados o reforzados por columnas y vigas de concreto. Además de las especificaciones referidas a los materiales de construcción, debe cumplirse con las especificaciones referidas a la geometría de los muros, densidad y distribución de los mismos en la planta, aberturas y otros requerimientos relacionados a las dalas y castillos de confinamiento. En la Figura 2c aparecen los muros de mampostería y vigas de hormigón armado que los unen a revisar estructuralmente para las cuantías de refuerzo límites especificados por las normativas de diseño.

#### 2.5.1. Mampostería reforzada interiormente a flexión compuesta y cortante

Se utiliza el *Método Optativo* recomendado por la norma mexicana, el cual se considera conservador para el chequeo de los estados límites a flexión compuesta de los muros de mampostería reforzada interiormente y con columnas de confinamiento exteriores. El detallado constructivo de los muros de mampostería reforzada parte de prefijar los diámetros máximos y espaciamientos del acero longitudinal y transversal que pueden ser colocados en el muro, siendo estos los datos de partida para su revisión estructural. En caso que no cumplan con los estados límites de resistencia a flexión compuesta y a cortante se considera que no serían construibles.

#### 2.5.2. Viga acoplada. Diseño a flexión y cortante

Para el diseño de la viga de acople se parte de un diseño conceptual según la ACI 318:2014, asumiendo dos variantes de colocación del acero transversal (con cercos simples y dobles). Si las vigas de acople no cumplen los estados límites de resistencia a flexión y a cortante para lo especificado en relación a los diámetros máximos de los aceros y sus espaciamientos límites, se considera que no serían construibles. Se analiza también si por las dimensiones geométricas de las vigas y la magnitud de los cortantes requieren de una armadura de refuerzo diagonal. En estos casos se consideran las vigas de acople no construibles, ya que este detallado constructivo es complicado conforme a los objetivos del estudio de estas variantes, donde prevalece las facilidades constructivas.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Discriminación de las variantes generadas

La evaluación del diseño sísmico estructural de las variantes, sustentado en las cuantías de refuerzo límites especificadas, permitió discriminar o confirmar aquella(s) que pudieran ser construidas en la zona sísmica objeto de estudio.

#### 3.2. Revisión estructural de las variantes estudiadas

Los resultados de la revisión estructural de las variantes estudiadas aplicando el *Método Estático Equivalente* y el *Método Espectro de Respuesta* se muestran a continuación.

#### Edificio de 4 pisos

##### A. Muros de Mampostería Reforzada Interiormente

**Flexión Compuesta:** Se comprueba que, según los datos de partida asumidos para la revisión estructural y para los dos métodos de análisis, todos los muros de mampostería reforzada desde el primer al último nivel de la estructura, en la dirección longitudinal y transversal, cumplen a flexión compuesta.

**Cortante:** Para los datos de partida asumidos en la revisión estructural de los muros del primer piso, la capacidad a cortante se excede para el *Método Estático Equivalente*, principalmente en los muros de la dirección transversal y algunos muros perimetrales en la dirección longitudinal, mostrándose la descarga de los muros debido a las cargas sísmicas como el criterio dominante. En ambas direcciones la capacidad resistente de los muros es superada es más de un 10% y fallan a cortante algunos muros en el segundo nivel. Los muros más solicitados son el G2, H1 y H2, que no resisten hasta el tercer nivel (Tabla 2). Corroborando los resultados con un método de cálculo menos conservador como el *Método del Espectro de Respuesta*, solo no resisten a cortante los muros interiores dispuestos desde el pórtico E hasta el H, cuyas capacidades resistentes son excedidas para los dos primeros pisos en más de un 10%.

##### B. Vigas de Acople de Hormigón Armado

El diseño a flexión y cortante procede para los datos de partida asumidos en la revisión estructural de las vigas que conectan a los muros dispuestos en la dirección longitudinal y transversal.

#### 3.3. Discriminación de variantes generadas para la zona sísmica objeto de estudio

La revisión estructural de los muros y vigas de acople ofreció criterios para la discriminación de variantes en la zona sísmica objeto de estudio. Así la variante de 4 niveles a construir en la ciudad de Santiago de Cuba sobre suelos rígidos puede ser discriminada, a menos que se realice una evaluación basada en sustituciones de muros de mampostería reforzada por muros de hormigón armado. Se recomienda probar una variante en la cual los muros perimetrales adyacentes a las esquinas (A1, A6, C1, C6, D1, D3, I1 e I3) y los muros perimetrales D2 e I2 se sustituyan por muros de hormigón armado continuos en toda la altura, para evitar irregularidades en elevación, asumiendo además un limitado incremento en el factor de reducción por ductilidad. La variante de 3 niveles puede construirse considerando un comportamiento sísmico

cuasi-elástico, lo cual garantizaría daños mínimos en los elementos estructurales sin comprometer su resistencia o la de la estructura en su conjunto.

**Tabla 2.** Resumen de la revisión estructural de los muros de mampostería reforzada para las variantes de 4 pisos. Dirección Y.

MUROS			Método del Espectro de Respuesta				Método Estático Equivalente			
Eje	Tipo	Longitud (mm)	Piso				Piso			
			4	3	2	1	4	3	2	1
D	D1	1450	-	-	-	-	-	-	-	-
	D2	2700	-	-	-	-	-	-	-	-
	D3	1450	-	-	-	-	-	-	-	-
E	E1	4100	-	-	C1	C1	-	-	C1	C1
	E2	3050	-	-	-	-	-	-	-	-
F	F1	2950	-	-	C1	C1	-	-	C1	C1
	F2	3050	-	-	C1	C1	-	-	C1	-
G	G1	2950	-	-	C1	C1	-	-	-	-
	G2	3050	-	-	C1	C1	-	C2	C1	C1
H	H1	4100	-	-	C1	C1	-	C1	C1	C1
	H2	3050	-	-	C1	C1	-	C1	C1	C1
I	I1	1450	-	-	-	-	-	-	C2	C1
	I2	2700	-	-	-	-	-	-	-	-
	I3	1450	-	-	-	-	-	-	C2	C1

- : Resiste a cortante y a flexión compuesta, C: No resiste a cortante, <sup>(1)</sup>: Capacidad insuficiente para resistir el Cortante por presencia de axiales de tracción, excede el 10%, <sup>(2)</sup>: Excede la capacidad en menos del 10%.

#### 3.4. Racionalización del acero para la variante de edificio aprobada

Una vez aprobada la variante de 3 niveles, se racionaliza su diseño estructural, haciendo modificaciones en los datos de partida para el diseño de los muros de mampostería reforzada interiormente, verificando que se cumplan las regulaciones de la norma mexicana de mampostería referidas a cuantías mínimas, espaciamientos máximos para el acero horizontal y vertical de los muros, así como el refuerzo vertical y transversal dispuestos en las dalas y castillos, que no comprometan la resistencia al cortante o a la flexión compuesta de los muros. Posterior a la racionalización del diseño estructural de cada uno de los elementos por separado se procede a la unificación del mismo, para lograr facilidades constructivas que conduzcan a un futuro proyecto ejecutivo (Figura 2d).

#### 3.5. Detalles constructivos sismorresistentes de los muros de mampostería reforzada, vigas de acople y muros de escaleras de hormigón armado

En la Figura 3 aparecen los detalles sismorresistentes de los muros de mampostería reforzada y sus uniones, así como del muro de escalera de hormigón armado. El refuerzo horizontal colocado en juntas de mortero está formado por barras continuas a lo largo del muro, entre columnas de hormigón

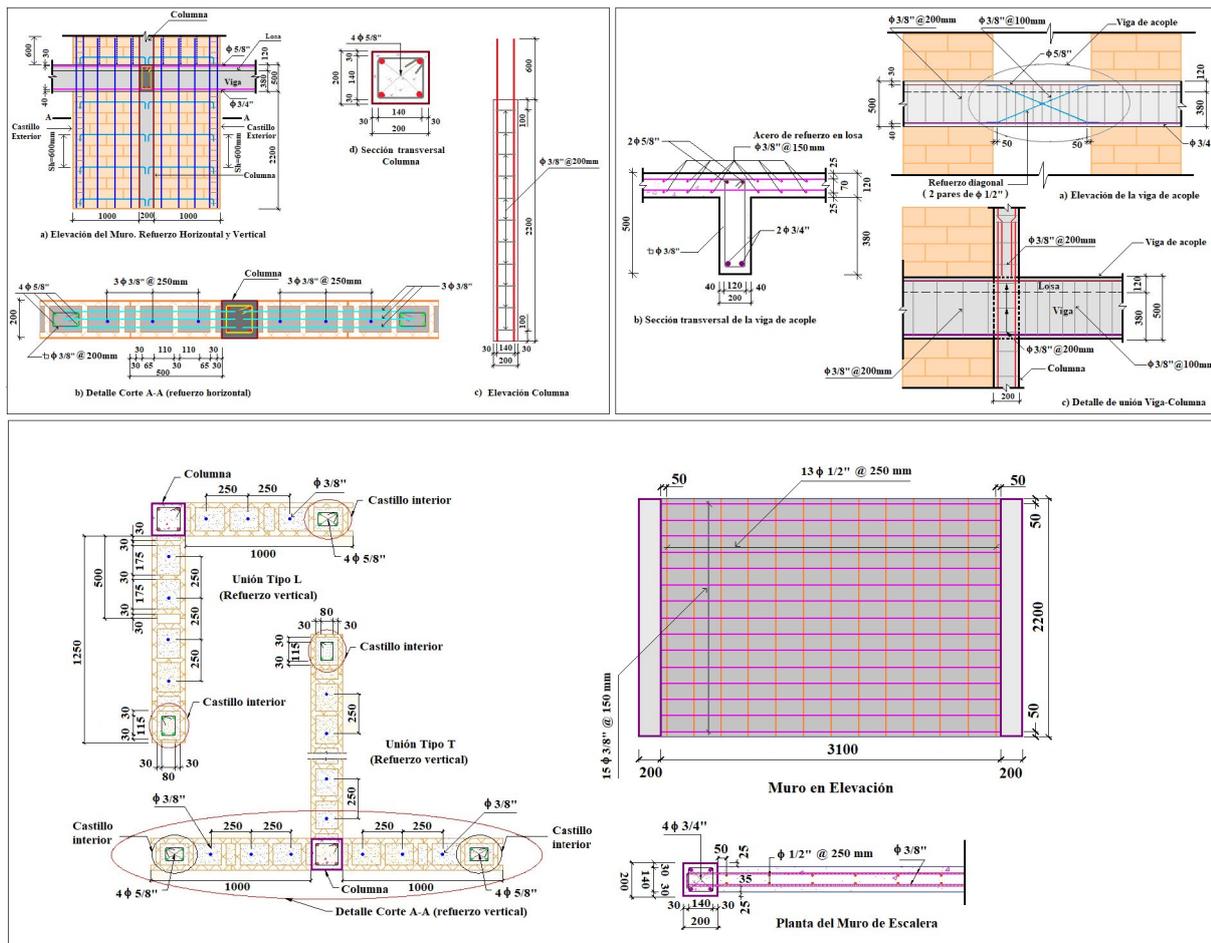


Figura 3. Diseño estructural de los muros de mampostería reforzada, vigas de acople y muro de escalera en el primer piso del edificios de 3 niveles con racionalización del acero de refuerzo.

armado y/o castillos y deben anclarse en estos elementos mediante dobleces a 90 grados.

### 3.6. Validación del diseño estructural haciendo uso del método de análisis lineal en el tiempo

Para la validación del diseño estructural se aplica el *Método de Análisis Lineal en el Tiempo* (41) utilizando acelerogramas escalados espectro-compatibles a partir de un sismo débil con epicentro cercano a la ciudad de Santiago de Cuba con fecha 17 de enero del 2016. Las tres componentes de aceleración del sismo (dirección EW, NS y vertical), registradas en roca en la estación Río Carpintero, fueron escaladas para un *Sismo Básico*, recomendado para el diseño de edificios ordinarios y compatibilizadas según los espectros de respuestas de diseño especificados por la NC 46:2017 para edificios en perfil de suelo D. El *Método de Análisis Lineal en el Tiempo* permite corroborar el comportamiento de elementos críticos para los estados límites revisados anteriormente.

#### 3.6.1. Escalado de terremotos

El escalado del sismo se hace por el procedimiento que aparece en (42), el cual analiza la sismicidad histórica de la región, definiendo las áreas de generación de eventos fuertes de mayor incidencia, seleccionando los sismos base del escalado con coordenadas cercanas a aquellas de los sismos históri-

cos. Los sismos base del escalado se obtienen de la estación Río Carpintero (Latitud 19,99 y Longitud -75,70) ubicada en rocas intrusivas (granitos) y magmáticas correspondientes a la Asociación Estructuro-Formacional (AEF) del arco insular volcánico del Paleógeno. Las señales de estos eventos fueron procesadas con el software SeismoSignal versión 5.1.0 (43). Se escalan los acelerogramas para distintas magnitudes de momento  $M_w$  (6,0, 6,5, 6,75, 7,0 y 7,5) considerando la magnitud de los sismos históricos del área y la magnitud máxima que genera la falla Oriente, utilizando la ley de escalado de Gusev (44). Por último, utilizando el software Seismomatch, se realiza el ajuste espectral de los sismos escalados con el espectro de respuesta obtenido del código cubano de diseño para el perfil de suelo y el peligro sísmico puntual del sitio de ubicación del edificio.

#### 3.6.2. Selección de los acelerogramas sísmicos

Para el chequeo de elementos críticos estos acelerogramas se muestran apropiados, según la NC 46:2017, con relación a las aceleraciones máximas de los sismos de cálculo (Figura 4). Esta norma recomienda que estos sismos para análisis en el tiempo alcancen aceleraciones horizontales máximas del suelo en la dirección predominante del sismo en el orden del 40% de las aceleraciones horizontales de respuestas para el dominio de resonancia del suelo. Así la aceleración máxima del suelo para edificios ordinarios en la ciudad de Santiago

de Cuba erigidos en suelos rígidos (perfil D) sería aproximadamente de 0,279g. La componente horizontal del sismo escalado en la dirección predominante se hizo coincidir con la dirección “Y” del edificio, correspondiéndose su aceleración máxima con lo especificado anteriormente. Además, se verifica que la aceleración de respuesta de la estructura, para su período de oscilación en esa dirección, obtenida del espectro de respuesta de la componente escalada del sismo de cálculo, esté en el orden de aquella especificada por el espectro de respuesta del código de diseño.

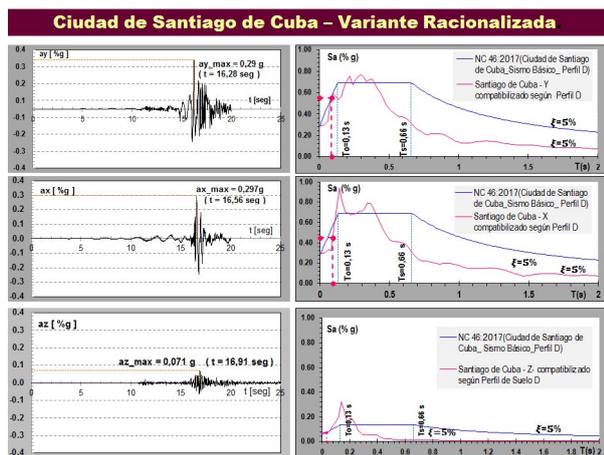


Figura 4. Acelerogramas escalados de cálculo y comparación de las aceleraciones de respuestas para los períodos fundamentales del edificio para las tres direcciones fundamentales de actuación del sismo.

La componente horizontal del sismo escalado en la dirección ortogonal a la dirección predominante del sismo se hizo coincidir con la dirección “X” del edificio, verificando lo recomendado por la NC 46:2017 para la consideración de acciones sísmicas simultáneas en las dos direcciones principales del edificio. Se establece que en la dirección ortogonal a la dirección predominante del sismo de cálculo actúa una componente sísmica, cuyas aceleraciones de respuestas en la estructura estén en el orden del 30% de las especificadas por el espectro de respuesta de diseño. Para el caso de estudio la aceleración de respuesta para el período fundamental en esa dirección resulta algo por debajo del valor especificado en la norma sísmica cubana. La componente vertical del sismo escalado alcanza aceleraciones máximas del suelo mucho menores a las componentes horizontales. Para el caso de estudio se corrobora que la componente vertical del sismo de cálculo apenas influye en el comportamiento del edificio, alcanzando aceleraciones de respuesta muy bajas para su período fundamental en esa dirección.

Para análisis en el tiempo del elemento crítico, se aplican los acelerogramas escalados, para las 3 direcciones principales del sismo. La validación del diseño estructural ocurre para una respuesta cuasi-elástica de la estructura. Esto es solo una aproximación al real comportamiento sísmico del edificio, ya que se ha asumido un factor de reducción por ductilidad de 1,6. Este

factor, aunque es bajo (*Ductilidad Natural*), se corresponde con una respuesta elasto-plástica, lo que para estudios más precisos se correspondería con la aplicación de un *Método de Análisis no Lineal*. Así se asume como hipótesis que para el chequeo de la capacidad resistente de los elementos el *Método de Análisis Lineal en el Tiempo* ofrece resultados válidos, basado en que la capacidad resistente de los muros se estima de formulaciones obtenidas de investigaciones experimentales, usando factores de seguridad muy conservadores y además el chequeo ocurre para un bajo nivel de demanda elasto-plástica.

### 3.6.3. Respuesta en el tiempo del elemento crítico seleccionado de la variante racionalizada de tres pisos

El análisis de la respuesta en el tiempo del elemento crítico seleccionado (muro F1) corrobora que la capacidad resistente a cortante no se excede (Figura 5).

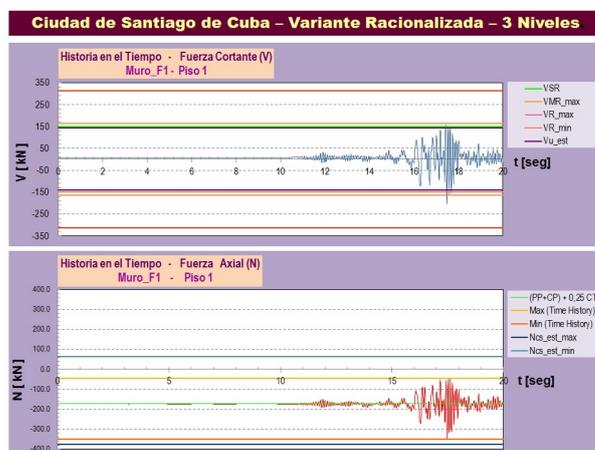


Figura 5. Historia en el tiempo de la fuerza cortante y de la fuerza axial del Muro F1 del primer piso.

- VSR: Contribución al cortante del acero transversal
- VMR<sub>max</sub>: Contribución al cortante de la mampostería no reforzada
- VR<sub>max/min</sub>: Cortantes resistentes extremos de la mampostería reforzada
- V<sub>u est</sub>: Cortante de cálculo por el método estático equivalente
- (PP+CP)+0,25CT: Axial debido a las cargas gravitatorias
- Max/Min (TH): Axiales extremos por el Time History
- NCS est max/min: Axiales extremos por el método estático equivalente

Esto ocurriría si en el muro actuarán axiales de tracción simultáneamente con los cortantes máximos, para lo cual se verifica la resistencia a cortante mínima (línea malva) obtenida de la contribución a cortante solo del acero horizontal dispuesto en el muro (línea verde). Esto no ocurrirá ya que de la historia en el tiempo de los axiales, resultan solo axiales de compresión. Según la historia en el tiempo los cortantes máximos quedan distantes de los valores máximos de capacidad resistente a cortante (línea naranja), no obstante excederían la resistencia a cortante de la mampostería sin reforzar (línea amarilla), lo que justifica el refuerzo horizontal dispuesto en el muro. Del análisis de los axiales debido a la acción combinada del sismo con las cargas gravitatorias resulta que, para toda la historia, la respuesta no excede a los valores

axiales extremos obtenidos del *Método Estático Equivalente* (líneas azules) para ciclos de cargas (compresiones) y descargas (tracciones). Estos axiales extremos son conservadores con relación a los obtenidos del análisis en el tiempo, pero en el mismo orden de estos últimos.

El diagrama de interacción a flexión compuesta (Figura 6) demuestra que las demandas sísmicas para el análisis en el tiempo no exceden la capacidad resistente a flexión compuesta del muro F1 y como se había referido anteriormente el muro estará sometido solo a flexo-compresión. Nótese que las demandas de capacidad a flexión compuesta del muro que resulta de las combinaciones de cargas utilizadas por el *Método Estático Equivalente* se corresponden aproximadamente con las ofrecidas por el *Método de Análisis Lineal en el Tiempo*, excepto que según el primer método pueden presentarse inversión de esfuerzos para las sollicitaciones axiales en el muro, aunque con axiales de compresión muy bajos.

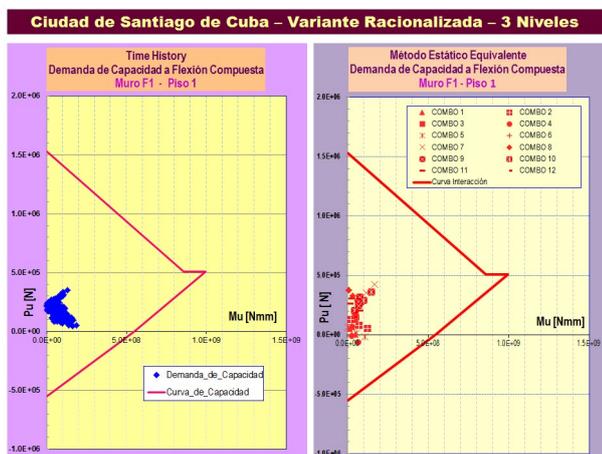


Figura 6. Chequeo de capacidad a flexión compuesta del Muro F1 del primer piso por el “Método de Análisis Lineal en el Tiempo” y por el “Método Estático Equivalente”.

El retroceso en la curva de interacción recomendada por la norma mexicana de mampostería, se justifica por el uso de un factor de seguridad menor para el cálculo del momento resistente a flexión de la sección transversal del muro para axiales de cálculo que superen el 33% de la capacidad resistente del muro a compresión axial. Para este caso la evaluación de la resistencia a flexión compuesta del muro es más conservadora, debido a que a partir de este axial existe el riesgo de un fallo frágil del muro, para el cual no se alcanza la deformación de fluencia del acero vertical. Para el muro analizado en la Figura 6 nótese que no existe el riesgo de un fallo frágil del mismo.

### 3.7. Análisis pushover de la variante seleccionada

En (45) se evalúa el desempeño sísmico de la variante seleccionada mediante el análisis estático no lineal (Pushover), según el procedimiento especificado en el ATC-40 (46), utilizando el Sap2000 Version 19.2.1. Se determina la capacidad portante del edificio y asociado a su punto de desempeño la capacidad por demanda y nivel de desempeño para el sismo ordinario utilizado para el diseño estructural del edificio. Para

realizar el Pushover se definen modelos de comportamiento de los materiales y secciones transversales determinadas a partir del detallado del acero y grado de confinamiento que posea el hormigón, implementando un modelo de fibras. El cortante basal para el punto de desempeño para el PushoverX (dirección longitudinal) es 1889.12 kN y para el PushoverY (dirección transversal) es 1957.92 kN, superiores a los valores de diseño adoptados para una ductilidad natural de 1,6, obtenidos del método del Estático Equivalente; 1510,39 kN en la dirección longitudinal y 1550,53 kN en la dirección transversal de la aplicación del código sísmico cubano, estando la diferencia en el orden del 21% (Figura 7).

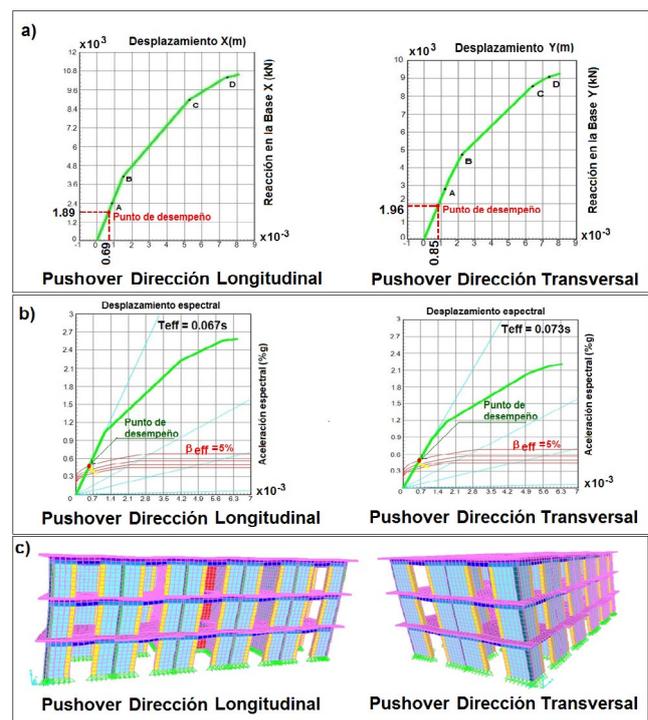


Figura 7. Análisis estático no lineal Pushover  
 a) Curvas de capacidad (CSM), b) Espectro de Capacidad Sa vs Sd (CSM), c) Patrón de deformación.

Las curvas de capacidad para el punto de desempeño demuestran una significativa reserva de capacidad resistente para un sismo básico, evitando que se produzca fallos frágiles en los muros (reserva de cortante del 26% para el muro crítico F-1) y vigas cortas y corroborando el comportamiento cuasi-elástico del edificio. Para ambos Pushover la relación entre el desplazamiento relativo para el punto de desempeño y la altura del último nivel, según los criterios de aceptación del ATC-40, garantiza la ocupación inmediata para el sismo ordinario asumido como sismo de diseño. Así las formulas de la norma mexicana garantizan un comportamiento cuasi-elástico lineal sin demanda de ductilidad, con reserva de capacidad elástica definida por el punto de desempeño, ante eventos que puedan exceder el sismo básico de cálculo. Debido a la reserva elástica de la estructura no se descarta un comportamiento con limitada ductilidad para un crecimiento en altura del edificio, lo que justificaría profundizar en el estudio de la variante de 4 pisos.

### 3.8. Valoración Técnico – Económica

Se conoce que los costos de la estructura por m<sup>2</sup> para viviendas ejecutadas con sistemas constructivos de grandes paneles prefabricados, muy utilizados en Cuba, superan en más del doble a las otras soluciones. En esto incide mucho los elevados costos de producción, transportación y montaje, debido al alto grado de mecanización, que exige la construcción prefabricada y la necesidad de una elevada inversión inicial con un período de amortización muy largo, para la construcción de las plantas de producción (47, 48). La construcción de viviendas sociales utilizando la mampostería reforzada con una ejecución artesanal en lo técnico-económico resulta una alternativa importante en zonas sísmicas (49, 50). En este epígrafe se hace una valoración técnico-económica de la superestructura del edificio de viviendas de 3 niveles a construir en la ciudad de Santiago de Cuba con mampostería reforzada, comparando con un edificio sismorresistente de pórticos espaciales dúctiles con igual modulación en planta e iguales puntales. La comparación se basa en los costos directos de construcción, partiendo de las actividades a realizar y volúmenes de materiales para cada variante, utilizando el software profesional Preswin 7.4 sustentado en el *Sistema de Precios de la Construcción* PRECONS II establecido por el MICONS (51). Los costos directos totales se obtuvieron para las variantes indicadas en la Tabla 3. En la comparación no se incluyen los costos de las losas de pisos y escaleras por ser iguales para ambas variantes.

En el costo total de la mampostería reforzada incide el macizado manual de los huecos con hormigón de 15MPa, siendo mayor su costo directo al comparar con las variantes de pórticos. En esto influye mucho la elaboración del hormigón en plantas de hormigón premezclado, conforme a lo que el Ministerio de la Construcción de Cuba ha utilizado en los últimos años para la construcción de viviendas sociales. Así siendo el hormigón de macizado algo más económico (258,51 \$/m<sup>3</sup>) que el hormigón de 30MPa (286,70 \$/m<sup>3</sup>), utilizado en vigas y columnas para la variante de pórtico, al alcanzar un volumen significativo el hormigón de macizado y siendo su colocación manual se encarece mucho el hormigonado para la mampostería reforzada. El hormigón de macizado de baja resistencia puede producirse en obra con hormigoneras, de garantizarse su control de calidad de producción y colocación. Esto disminuiría mucho los costos al no depender de la distancia a transportar con camiones hormigoneras, con costos similares para distintas calidades de hormigón. Los costos directos de construcción de la mampostería reforzada dismi-

nuirían a \$32446.40 utilizando hormigoneras estacionarias, sin considerar los costos de transportación de los materiales de construcción.

El macizado manual de los huecos resulta la actividad crítica para los costos directos de construcción, determinando que los pórticos dúctiles resulten aparentemente más económicos. No obstante el macizado de los huecos con hormigón determina el buen comportamiento de la mampostería reforzada ante grandes sollicitaciones sísmicas. Algunos países como Japón establecen el obligatorio macizado de los muros por los daños reportados de la mampostería reforzada ante sismos fuertes (52). La relativa desventaja de la mampostería reforzada, en cuanto a costos directos de construcción, en relación con los pórticos dúctiles de hormigón armado, se compensa con la demanda de menores costos por reparación de daños sísmicos debido a su comportamiento cuasi-elástico. Se conoce que el comportamiento dúctil de los pórticos de hormigón armado se verifica a expensas de los significativos daños en las zonas plásticas, con elevados costos de reparación y complejas soluciones técnicas para restituir la capacidad resistente de la estructura. En muchos casos el elevado costo de reparación determina la demolición de la edificación. Investigaciones recientes (53) demuestran que los costos de reparación por daños sísmicos calculados para edificios dúctiles de hormigón armado, con períodos de vida útil de 50 años y diseñados conformes a las normas vigentes, para sismos ordinarios están en el rango del 12% al 34% del costo de reemplazo del edificio. Estos costos de reparación dependen mucho del factor de reducción por ductilidad asumido en el diseño y será mayor en las edificaciones de menos pisos, ya que para estas últimas será mayor el por ciento de elementos estructurales dañados.

Finalmente en el contexto cubano actual los sistemas constructivos utilizados para edificios de viviendas similares muestran indicadores mucho más altos que los de la mampostería reforzada. En el caso de los edificios de viviendas de tres pisos, construidos con el sistema de muros de concreto reforzado FORSA, el cual usa formaleas de aluminio, su costo excede significativamente al de la variante de mampostería reforzada (\$180749.26 versus \$50371.6). El análisis de los costos directos de construcción confirma que ambas variantes pueden ejecutarse en la ciudad de Santiago de Cuba, resultando menos costosa la variante de pórticos dúctiles de hormigón armado, para la cual los costos de reparación pos desastre deben superar significativamente los costos de la variante de mampostería.

**Tabla 3.** Resumen de indicadores etapa estructura por variante.

Indicadores Etapa de Estructura	Unidad	Pórtico Espacial Dúctil		Mampostería Reforzada
		Hormigón (Vertido Manual)	Hormigón (Vertido con Grúa y Cubo)	Hormigón (Vertido Manual)
Cantidad de Acero	t	9,06	9,06	8,57
Volumen de Hormigón (15 MPa)	m <sup>3</sup>	0,00	0,00	45,09
Volumen de Hormigón (30 MPa)	m <sup>3</sup>	46,75	46,75	35,00
Encofrado	m <sup>2</sup>	507,47	507,47	336,40
Muros	m <sup>2</sup>	458,16	458,16	431,42
Costo Total por área construida	\$/m <sup>2</sup>	91,28	91,07	104,86
Índice de Acero por m <sup>3</sup> de Hormigón	t/m <sup>3</sup>	0,19	0,19	0,11

#### 4. CONCLUSIONES

1. La revisión estructural de los muros de mampostería reforzada muestra al estado límite último de cortante como dominante, siendo los muros interiores en la dirección transversal los críticos y mostrándose la descarga de los muros debido a las cargas sísmicas como el criterio dominante en la evaluación del desempeño de los mismos.
2. La revisión estructural permitió sacar conclusiones acerca de las edificaciones de mampostería reforzada a construir en suelos rígidos en la ciudad de Santiago de Cuba:
  - a. Construir variantes de edificios de hasta 3 niveles racionalizando el acero de refuerzo que asegure un comportamiento cuasi-elástico ante las acciones sísmicas.
  - b. Utilizar bloques de concreto de 20 cm de espesor con resistencia de diseño a compresión mínima de 10 MPa. Estas resistencias mínimas para el mortero de pega y de relleno alcanzarán 12,5 MPa y 15MPa respectivamente.
  - c. Construir el muro de escalera de hormigón armado con doble malla con columnas de hormigón armado a ambos extremos y fundidas integralmente con el muro.
  - d. Deben disponerse columnas de hormigón armado de 20 x 20 cm como elementos confinantes en las intersecciones de cada uno de los ejes longitudinales y transversales, que definen los módulos de la edificación.
3. El *Método de Análisis Lineal en el Tiempo* haciendo uso de acelerogramas sintéticos escalados a partir de un sismo débil registrado en la ciudad de Santiago de Cuba el 17 de

enero del 2016 corroboró el buen desempeño de los muros de mampostería reforzada de la variante de 3 pisos.

4. Las formulaciones de la norma mexicana para el diseño sismorresistente del caso de estudio garantizan la ocupación inmediata con un comportamiento cuasi-elástico, con reserva de capacidad elástica definida por el punto de desempeño, ante eventos que sobrepasen el sismo básico.
5. Para la construcción de edificios de 4 pisos de mampostería reforzada se recomendaría probar una variante en la cual los muros perimetrales s adyacentes a las esquinas (A1, A6, C1, C6, D1, D3, I1 e I3) y los muros perimetrales D2 e I2 se sustituyan por muros de hormigón armado continuos en toda la altura, para evitar irregularidades en elevación, asumiendo adicionalmente un limitado incremento en el factor de reducción por ductilidad.
6. El análisis comparativo de los costos directos de construcción con los de edificios de viviendas de pórticos dúctiles confirma que la mampostería reforzada para la ciudad de Santiago de Cuba exige de hormigón de macizado producido en obra con hormigoneras y un estricto control de calidad para su producción y colocación.

#### AGRADECIMIENTOS

Al Doctor Ingeniero Darío Candebat Sánchez por su contribución al escalado de los sismos sintéticos. A la Master Ingeniera Olga Romero González y a las Ingenieras Dayami Antunez Urias y Dianelis Valdés Espinosa por sus valiosas colaboraciones en trabajos de diploma que tributaron a esta investigación.

#### REFERENCIAS

- (1) Gallegos, H. (1999). Capítulo 7 Las estructuras de mampostería. Sanchez, T., Zepeda, O. (Ed.). *Edificaciones de mampostería para vivienda* (pp. 3-14). México, D. F.: Fundación ICA, A.C. [https://www.academia.edu/28344312/EDIFICACIONES\\_DE\\_MAMPOSTER%C3%8DA\\_PARA\\_VIVIENDA](https://www.academia.edu/28344312/EDIFICACIONES_DE_MAMPOSTER%C3%8DA_PARA_VIVIENDA)
- (2) Alcocer S.M., Klingner R.E. (1994). Masonry research in the Americas. Abrams, D. (Ed) *Masonry in the Americas* (pp. 127-170). Detroit: American Concrete Institute. <https://pdfcoffee.com/edificio-de-mamposteria-5-pdf-free>
- (3) Tomazevic, M. (1996). *Recent advances in earthquake-resistant design of masonry buildings: European prospective*. Memorias de la II Conferencia Mundial de Ingeniería Sísmica, Acapulco, México. Art. 2012. [https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11\\_2012.PDF](https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_2012.PDF).
- (4) Paulay, T., Priestley, M. (1992). *Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings*, p. 744, New York: John Wiley & Sons. <https://hoseinzadeh.net/seismic%20design%20of%20reinforced%20concrete%20and%20masonry%20buildings.pdf>
- (5) Cano, G. (1997). Revisión del comportamiento de muros de bloque de concreto ante cargas laterales (Tesis de licenciatura). México, D.F. UNAM. [https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=ZvBG30&d=false&q=\\*&i=9&v=1&t=search\\_o&as=2](https://repositorio.unam.mx/contenidos?c=ZvBG30&d=false&q=*&i=9&v=1&t=search_o&as=2)
- (6) Bennett, R. B. (2013). Seismic performance quantification of concrete block masonry structural walls with confined boundary elements and development of the normal strain-adjusted shear strength expression (NSSE). <https://macsphere.mcmaster.ca/handle/11375/12883>.
- (7) Janaraj, T., Dhanasekar, M. (2014). Finite element analysis of the in plane shear behaviour of masonry panels confined with reinforced grouted cores. *Construction and Building Materials*. 65, 495–506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.133>.
- (8) Abdellatif, A., Shedid, M., Okail, H., Abdelrahman, A. (2019). Numerical modeling of reinforced masonry walls under lateral loading at the component level response as opposed to system level response, *Ain Shams Engineering Journal*. 10(2), 435-451. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090447919300048?via%3Dihub>.
- (9) Zhang, Z., Delso, J. M., Sandoval, C., Araya-Letelier, G., Wang, F. (2021). In-plane shear strength and damage fragility functions for partially-grouted reinforced masonry walls with bond-beam reinforcement, *Engineering Structures*. 242(2021), 112569. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112569>.
- (10) Zhao, Y., Wang, F. (2015). Experimental studies on behavior of fully grouted reinforced-concrete masonry shear walls. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 14(4), 743–757. <https://doi.org/10.1007/s11803-015-0030-5>.
- (11) Hasan, M., Saidi, T., Sarana, D., Bunyamin (2021). The strength of hollow concrete block walls, reinforced hollow concrete block beams, and columns. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363921000155>.
- (12) Chi, B., Yang, X., Wang, F., Zhang, Z., Quan, Y. (2019). Experimental investigation into the seismic performance of fully grouted concrete masonry walls using new prestressing technology. *Applied Sciences*. 9(20). <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/20/4354>.

- (13) Can, Ö. (2018). Investigation of seismic performance of in-plane aligned masonry panels strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer. *Construction and Building Materials*. 186, 854–862. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.028>.
- (14) Rabinovich, A. (2010). Los intereses sectoriales de la vivienda social en Cuba, *EchoGéo (on line)*. <https://journals.openedition.org/echogeo/11695>.
- (15) Ministerio de la Construcción (2020). Política de la vivienda en Cuba. <https://www.micons.gob.cu/sites/default/files/MICONS/Marco%20Normativo/POLITICA%20GENERAL%20DE%20LA%20VIVIENDA.pdf>.
- (16) Moreno, J. (2015). Déficit habitacional en América Latina y el Caribe: una herramienta para el diagnóstico y el desarrollo de políticas efectivas en vivienda y hábitat. Programa de la Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos ONU-HABITAT. <https://unhabitat.org/sites/default/files/download-manager-files/D%C3%A9ficit%20habitacional.pdf>.
- (17) NTCM (2017). *Norma mexicana. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería*. Comité de Normas del Distrito Federal (NTCM). <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/745.pdf>
- (18) NSR (2017). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente. NSR-10. Título D-Mampostería Estructural Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. Instituto Colombiano de Ingeniería Sísmica. <https://www.idrd.gov.co/sites/default/files/documentos/Construcciones/4titulo-d-nsr-100.pdf>
- (19) Eurocode 6 (2005). *Design of masonry structures-Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures*, ENV 1996-1-1: 1995 BS EN 1996-1-1:2005+A1:2012 Eurocode 6. *Design of masonry structures. General rules for reinforced and unreinforced masonry structures* (Eurocode). <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1996.1.1.2005.pdf>
- (20) Masonry Standards Joint Committee (1995a). *Building Code Requirements for Masonry Structures*, ACI 530-95/ASCE 5-95/TMS 402-95, American Concrete Institute, Detroit, Michigan; American Society of Civil Engineers, New York,; and The Masonry Society, Boulder, Colorado (MSJC). [https://www.google.com/books/edition/Building\\_Code\\_Requirements\\_for\\_Masonry\\_S/t-SqQgAACAAJ?hl=es](https://www.google.com/books/edition/Building_Code_Requirements_for_Masonry_S/t-SqQgAACAAJ?hl=es)
- (21) Masonry Standards Joint Committee (MSJC) (1995b). *Specification for Masonry Structures*, ACI 530.1-95/ASCE 6-95/TMS 602-95, American Concrete Institute, Detroit, Michigan; American Society of Civil Engineers, New York,; and The Masonry Society, Boulder, Colorado (MSJC). [https://www.google.com/books/edition/Building\\_Code\\_Requirements\\_for\\_Masonry\\_S/t-SqQgAACAAJ?hl=es](https://www.google.com/books/edition/Building_Code_Requirements_for_Masonry_S/t-SqQgAACAAJ?hl=es)
- (22) CEN-EN 1998-1 (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 1: General rules, seismic action and rules for buildings. (Eurocode). [https://www.google.com/books/edition/Handbook\\_of\\_Research\\_on\\_Seismic\\_Assessme/R7YyCgAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=CEN%E2%80%931+2005.&pg=PR53&printsec=frontcover](https://www.google.com/books/edition/Handbook_of_Research_on_Seismic_Assessme/R7YyCgAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=CEN%E2%80%931+2005.&pg=PR53&printsec=frontcover)
- (23) CEN-EN 1998-3 (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance, Part 3: Strengthening and repair of buildings. (Eurocode). [https://www.google.com/books/edition/Handbook\\_of\\_Research\\_on\\_Seismic\\_Assessme/R7YyCgAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=CEN%E2%80%933+2005.&pg=PR53&printsec=frontcover](https://www.google.com/books/edition/Handbook_of_Research_on_Seismic_Assessme/R7YyCgAAQBAJ?hl=es&gbpv=1&dq=CEN%E2%80%933+2005.&pg=PR53&printsec=frontcover)
- (24) Federal Emergency Management Agency (1997). *NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 273). [https://www.google.com/books/edition/NEHRP\\_Guidelines\\_for\\_the\\_Seismic\\_Rehabil/XagsmAEEACAAJ?hl=es](https://www.google.com/books/edition/NEHRP_Guidelines_for_the_Seismic_Rehabil/XagsmAEEACAAJ?hl=es)
- (25) ACI 318:2014 (2014). *Reglamento para las construcciones de concreto estructural y comentarios*. American Concrete Institute (ACI). [https://www.google.com/books/edition/Building\\_Code\\_Requirements\\_for\\_Structura/67YNgEA-CAAJ?hl=es](https://www.google.com/books/edition/Building_Code_Requirements_for_Structura/67YNgEA-CAAJ?hl=es)
- (26) Norma Cubana (NC). *NC46:2017*. (2017). *Construcciones sismorresistentes. Requisitos básicos para el diseño y la construcción*. Comité Estatal de Normalización (CONCE). <https://es.scribd.com/document/373479452/118-NC-46-Construcciones-Sismorresistentes>
- (27) Rosencrantz, E., Mann P. (1991). SeaMARC II mapping of transform faults in the Cayman trough, Caribbean Sea. *Geology*, (19), 690–693. [https://www.google.com/books/edition/Publications\\_of\\_the\\_Geological\\_Survey/foOoJhngoc-C?hl=es&gbpv=1&dq=SeaMARC+II+mapping+of+transform+faults+in+the+Cayman+trough,+Caribbean+Sea.&pg=RA1-PA294&printsec=frontcover](https://www.google.com/books/edition/Publications_of_the_Geological_Survey/foOoJhngoc-C?hl=es&gbpv=1&dq=SeaMARC+II+mapping+of+transform+faults+in+the+Cayman+trough,+Caribbean+Sea.&pg=RA1-PA294&printsec=frontcover)
- (28) Chuy, T.J. (1999). *Macrosísmica de Cuba y su aplicación en los estimados de peligrosidad y microzonación sísmica* (Tesis de Doctorado no publicada). La Habana: Instituto de Geofísica y Astronomía. <http://www.cenais.cu/productos/publicaciones/TESIS/DOCTORADOS/TESIS%20DOCTORAL-Tom%C3%A1s%20Chuy.pdf>
- (29) Cotilla, M. (2012). Historia sobre la sismología del Caribe septentrional. *Revista De Historia De América*, 147(111–154). <https://www.jstor.org/stable/24641996>.
- (30) Alvarez, L., Lindholm, C., Villalón, M. (2017). Seismic Hazard for Cuba: A New Approach. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 107 (1), 229–239. <https://doi.org/10.1785/0120160074>.
- (31) García, J. (2007). Estimados de peligrosidad sísmica con el error asociado para Cuba, y cálculo de pérdidas para la ciudad de Santiago de Cuba usando técnicas SIG (Tesis de Doctorado no publicada). Santiago de Cuba: Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas. <http://www.cenais.cu/productos/publicaciones/TESIS/DOCTORADOS/TESIS%20DOCTORAL-Julio%20Garc%C3%ADa.pdf>
- (32) ASCE/SEI 07-10 (2010). *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. American Society of Civil Engineers (ASCE). [https://www.google.com/books/edition/Minimum\\_Design\\_Loads\\_for\\_Buildings\\_and\\_Ofs\\_qngEA-CAAJ?hl=es](https://www.google.com/books/edition/Minimum_Design_Loads_for_Buildings_and_Ofs_qngEA-CAAJ?hl=es)
- (33) Brea, M (2012). *Diseño de variantes de edificios de mampostería reforzada en la zona de mayor peligrosidad sísmica* (Trabajo de Diploma no publicado). Santiago de Cuba: Universidad de Oriente.
- (34) Alvarez, E., Pérez, Y. (2008). Comportamiento estructural de edificios de viviendas de mampostería reforzada en zonas de alta peligrosidad sísmica. *Revista Ingeniería Civil CEDEX*, (149), 141 -153. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2572777>

- (35) Kingsley, G., Bemson, P., Gangel, T. (2014). NEHRP Seismic design technical brief No. 9: Seismic design of special reinforced masonry shear walls. Grant/Contract Reports (NISTGCR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. <https://www.nist.gov/publications/nehrp-seismic-design-technical-brief-no-9-seismic-design-special-reinforced-masonry>.
- (36) Lepage, A., Sanchez, R. (2012). Practical nonlinear analysis for limit design of reinforced masonry walls. *The Open Civil Engineering Journal*. (6), 107-118. [https://www.researchgate.net/publication/260871179\\_Practical\\_Nonlinear\\_Analysis\\_for\\_Limit\\_Design\\_of\\_Reinforced\\_Masonry\\_Walls](https://www.researchgate.net/publication/260871179_Practical_Nonlinear_Analysis_for_Limit_Design_of_Reinforced_Masonry_Walls)
- (37) Wilson, E.L. (1998). Three - dimensional static and dynamic analysis of structures. A Physical Approach *with Emphasis on Earthquake Engineering*. pp. 423, Berkeley: Computers & Structures Inc. [https://www.google.com/books/edition/Three\\_Dimensional\\_Static\\_and\\_Dynamic\\_Ana/tKMuaAAACAAJ?hl=es](https://www.google.com/books/edition/Three_Dimensional_Static_and_Dynamic_Ana/tKMuaAAACAAJ?hl=es)
- (38) Zienkiewicz, O., Taylor, R. (2000). *The Finite Element Method: The Basis* (fifth edition), 1, 689, Oxford: Butterworth-Heinemann. <http://ceb.ac.in/knowledge-center/E-BOOKS/The%20Finite%20Element%20Method%20Vol1%20-%20The%20Basis%20-%20R.%20Taylor.pdf>
- (39) ACI 318:2019 (2019). *Reglamento para las construcciones de concreto estructural y comentarios*. American Concrete Institute (ACI). [https://www.google.com/books/edition/Building\\_Code\\_Requirements\\_for\\_Structura/5O\\_PxQEA-CAAJ?hl=es](https://www.google.com/books/edition/Building_Code_Requirements_for_Structura/5O_PxQEA-CAAJ?hl=es)
- (40) Mojsilović, N. (2014). *Assessment of the Unreinforced Masonry Shear Wall Stiffness*. In Proceedings of International Conference on Construction Materials and Structures, Johannesburg, South Africa. pp. 1157–1163. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-466-4-1157>.
- (41) Chopra, A. (1995). *Dynamics of Structures. Theory and Applications to Earthquake Engineering*, pp. 467-514, New Jersey: Editorial Prentice Hall. [https://www.google.com/books/edition/Dynamics\\_of\\_Structures/rsZRAAAAMAAJ?hl=es&gbpv=1&bsq=Dynamics+of+Structures.+Theory+and+Applications+to+Earthquake+Engineering,&dq=Dynamics+of+Structures.+Theory+and+Applications+to+Earthquake+Engineering,&printsec=frontcover](https://www.google.com/books/edition/Dynamics_of_Structures/rsZRAAAAMAAJ?hl=es&gbpv=1&bsq=Dynamics+of+Structures.+Theory+and+Applications+to+Earthquake+Engineering,&dq=Dynamics+of+Structures.+Theory+and+Applications+to+Earthquake+Engineering,&printsec=frontcover)
- (42) Candebat, D. (2017). Procedimiento de análisis del riesgo para la rehabilitación estructural sismorresistente de puentes de hormigón, de vigas, de carreteras (Tesis doctoral no publicada). La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana. <http://www.cenais.cu/productos/publicaciones/TESIS/DOCTORADOS/TESIS%20DOCTORAL-Dario%20Candebat.pdf>
- (43) Seismosoft (2020). SeismoSignal 2020 – A computer program for signal processing of strong-motion data. <https://www.seismosoft.com>.
- (44) Gusev, A. (1983). Descriptive statistical model of earthquake source radiation y its application to an estimation of short-period strong motion. *Geophys. J. Int.*, 74(3), 787-808. <https://academic.oup.com/gji/article/74/3/787/579067>
- (45) Lora, F. (2018). Evaluación del desempeño de un edificio de viviendas de tres niveles construido con mampostería reforzada en Santiago de Cuba (Tesis de maestría no publicada). Santiago de Cuba: Universidad de Oriente. <http://www.cenais.cu/productos/publicaciones/TESIS/MAESTRIAS/TESIS%20MAESTR%C3%8DA-Fidel%20Lora.pdf>
- (46) ATC (1996). ATC 40 Report The Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied Technology Council (ATC). <https://www.atcouncil.org/pdfs/atc40toc.pdf>
- (47) Samuel Russell, R. (1990). *Industrialización en las edificaciones para viviendas*, p. 672, La Habana: Editorial Científico-Técnica. <http://biblioteca.ueb.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=13108>
- (48) Maspons, R. et al. (1987). Prefabricación, p. 415, La Habana: Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echevarría.
- (49) Melgar, J. (2015). Comparación de costos en la construcción de viviendas en serie con los sistemas de mampostería reforzada tradicional vs. concreto reforzado que utiliza formaleta de aluminio, en el Condominio Valle de los Sauces del municipio de San José Pinula del Departamento de Guatemala. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. <https://www.repositorio.usac.edu.gt/1838/>.
- (50) Cordero, C. (2015). Estudio comparativo de cuatro sistemas constructivos en la ciudad de Cuenca, aplicación a una vivienda de dos pisos (Tesis de maestría). Cuenca: Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21468>.
- (51) PRECONS (2005). Norma cubana. PRECONS II Sistema de Precios de la Construcción. Comité Estatal de Normalización (CONCE). <https://es.scribd.com/document/392084209/Precons-II-pdf>
- (52) Melli, R. (1990). Diseño sísmico de muros de mampostería. La práctica actual y el comportamiento observado, *Ingeniería Sísmica SMIS*. (40), 7-28. <https://smis.mx/index.php/RIS/article/view/326>
- (53) Ramírez, C., et al. (2012). Expected earthquake damage and repair costs in reinforced concrete frame buildings. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. 41(11). <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eqe.2216>.