

# Validación del análisis estructural en el Gran Panel Soviético integrando procedimientos sísmicos lineales dinámicos y estáticos

Validation of the structural analysis in the Great Soviet Panel integrating dynamic and static linear seismic procedures

Fecha de envío: 21 de junio 2022

Fecha de aceptación: 27 de octubre 2022

Yamila C. Socarrás<sup>1</sup>, Eduardo R. Álvarez<sup>2</sup>, Darío Candebat-Sánchez<sup>3</sup>, José Ignacio Olivero<sup>1</sup> y Arides Herrera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente, Avenida de Céspedes 709 altos. Esq. N. Reparto Sueño, Santiago de Cuba, Cuba, ysocarrascordovi@gmail.com (Orcid:0000-0002-3198-3543), jiolivero@gmail.com, aherrera@gmail.com

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Construcciones, Universidad de Oriente, Calle 6 No. 21. Reparto Santa Bárbara, Santiago de Cuba, Cuba, ealvarez@uo.edu.cu (Orcid:0000-0003-1819-263X)

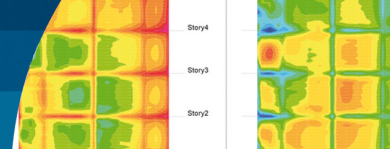
<sup>3</sup> Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba, dario@cenais.cu (Orcid:0000-0002-0066-4937)

*Algunos procedimientos que modelan los fenómenos sísmicos los consideran como eventos de naturaleza dinámica, pero existen otros que estiman una naturaleza estática. Al mismo tiempo, en ellos se puede contemplar o no, el comportamiento no lineal de las estructuras. No se puede afirmar que un procedimiento supera por completo a los otros. Pero sí se puede alegar la conveniencia de integrarlos en la práctica. En esta investigación, teniendo en cuenta los argumentos anteriores, se emplean de conjunto varios procedimientos, el Método Estático Equivalente, Método Espectro de Respuesta y Método de Registro en el Tiempo, con el objetivo de validar el análisis estructural en los elementos críticos del edificio U-142-143 construido con el sistema prefabricado Gran Panel Soviético en la ciudad de Santiago de Cuba. Luego de obtener las solicitaciones de cálculo, los elementos críticos resultaron ser los paneles exteriores transversales. En estos elementos los esfuerzos cortantes, axiales y momentos máximos, alcanzan valores superiores para el Método de Registro en el Tiempo; superando incluso los valores máximos absolutos obtenidos con la aplicación del Método Estático Equivalente. Se aprecia que son determinantes en el análisis las combinaciones de cargas que consideran acciones sísmicas predominantes en la dirección de los paneles u ortogonales a los mismos, combinadas con cargas gravitatorias máximas o mínimas. Sin embargo, la combinación de carga para la cual predomina la componente sísmica vertical no resulta dominante en el análisis. Se corrobora así mismo, un comportamiento estructural asociado a edificaciones con irregularidades en planta.*

**Palabras clave:** Gran Panel Soviético, hormigón prefabricado, análisis lineal estático, análisis lineal dinámico, Método Estático Equivalente, Método Espectro de Respuesta, Método de Registro en el Tiempo

*Some procedures that model seismic phenomena consider them as events of a dynamic nature, but there are others that estimate a static nature. At the same time, the non-linear behaviour of the structures can be considered or not in them. It cannot be pointed out that one procedure is completely superior to the others. However, the convenience of integrating them in practice can be argued. In this investigation, taking into account the previous arguments, several procedures are used, namely, the Equivalent Static Method, the Response Spectrum Method and the Time Record Method. The aim is validating the structural analysis in the critical elements of the U-142-143 building, built with the prefabricated Great Soviet Panel system in the city of Santiago de Cuba. After obtaining the calculation requirements, the critical elements turned out to be the transverse exterior panels. In these elements, the shear, axial and maximum moments reach higher values for the Time Record Method; even exceeding the absolute maximum values obtained with the application of the Equivalent Static Method. The combinations of loads that consider predominant seismic actions in the direction of the panels or orthogonal to them, combined with maximum or minimum gravitational loads, are determining factors in the analysis. However, the load combination for which the vertical seismic component predominates is not dominant in the analysis. Likewise, a structural behaviour associated with buildings with irregularities in plan is corroborated.*

**Keywords:** Great Soviet Panel, precast concrete, linear static analysis, linear dynamic analysis, Equivalent Static Method, Response Spectrum Method, Time Record Method



## Introducción

Los fenómenos sísmicos pueden ser modelados como eventos de naturaleza dinámica o estática, considerando o no el comportamiento no lineal de las estructuras. Lo cual evidencia que la comunidad científica, en relación al análisis del comportamiento de las estructuras ante los sismos, aún no ha definido un único procedimiento. De manera que las normas de diseño sismorresistente engloban los procedimientos de análisis sísmico en cuatro grandes grupos:

- Procedimientos de análisis sísmico lineal estático como el Método Estático Equivalente (MEE)
- Procedimientos de análisis sísmico lineal dinámico como el Método de Espectro de Respuesta (MER), Método de Registro en el Tiempo (MRT) y Análisis Modal.
- Procedimientos de análisis sísmico no lineal estático (*pushover*)
- Procedimientos de análisis sísmico no lineal dinámico

Según Pinzón (2015), el análisis no lineal es un concepto relativamente nuevo, por lo que todavía se encuentra en una etapa de implementación práctica (no así académica) y las normativas vigentes aún no tienen suficiente definición al respecto. Aunque sí se reconoce que el análisis no lineal es una herramienta muy poderosa para los estudios de vulnerabilidad sísmica y validación del diseño estructural, ya que permiten “justificar” de una manera formal que, si bien no se cumplan a cabalidad todos los requerimientos de las normas vigentes, la edificación aún puede comportarse adecuadamente ante un evento sísmico. En particular, el análisis no lineal dinámico es la metodología de análisis sísmico más completa que existe en la actualidad, pues permite conocer la variación en el tiempo de cualquier respuesta de la edificación estimando además la no linealidad de la estructura. Sin embargo, es más compleja de implementar porque conlleva grandes esfuerzos analíticos y numéricos que implican el uso de una herramienta computacional avanzada.

Así mismo, se pueden detallar limitaciones de los procedimientos de análisis no lineal estático, y de los de análisis lineal estático o dinámico como el MER, MRT y Análisis Modal. De modo que todos tienen sus ventajas y desventajas, y no se puede afirmar que un método supera por completo a los otros. Pero si se puede alegar la conveniencia

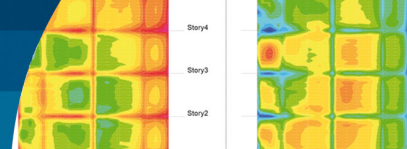
de integrarlos en la práctica y la necesidad de continuar mejorando los procedimientos actuales de análisis y diseño sísmico. En este sentido, Devecsery *et al.* (2018) propone el concepto de análisis híbrido optimista como una metodología de análisis que integra el análisis estático en un primer paso con el dinámico como objetivo final.

Se pueden citar varios estudios comparativos o de integración de los procedimientos de análisis sísmico. Herrera *et al.* (2012) combinan el análisis elástico y el no lineal tanto con empuje incremental como dinámico, para representar de forma más realista y calibrar las características estructurales de un edificio existente con sistema aporticado de concreto armado de baja altura. Medina y Galarza (2020) verifican la aplicabilidad de los métodos de análisis no lineal *pushover* y *pushover* multimodal para estructuras torsionalmente flexibles cuyo período de vibración fundamental es mayor a 1 s, confrontando los resultados con un análisis de historia de respuesta no lineal. Salas y Hernández (2021) realizan un análisis comparativo entre el método estático equivalente y el método de análisis modal en estructuras regulares de muros portantes de hormigón armado.

En esta investigación, teniendo en cuenta los argumentos anteriores se emplean de conjunto el MEE, MER y MRT para obtener las solicitaciones de cálculo en los elementos críticos del edificio U-142-143, construido con el sistema prefabricado Gran Panel Soviético; que permitan validar el análisis estructural (ver Figura 1). De forma tal, que se aprovechan las ventajas de cada método, superándose las limitaciones del MEE y el MRT, en relación a los modos de vibración, empleándose así, las propiedades de vibración de la estructura obtenidas a través del análisis modal. Al mismo tiempo se restringen, las limitaciones del MEE y



Figura 1: Edificio Gran Panel Soviético U-142-143 ubicado en Santiago de Cuba



el MER, en cuanto a la desestimación de la variable tiempo al integrarse con el MRT, lo que permite precisar cuántas veces se repetirían las solicitaciones críticas durante la actuación del sismo de cálculo compatible con el espectro de diseño. Las secciones críticas de los paneles, se definen previamente, de acuerdo al análisis de los mapas de tensiones normales y tangenciales de estos elementos y, a las solicitaciones resultantes en las secciones transversales definidas en el modelo estructural.

Del estudio realizado se obtiene que los paneles exteriores transversales son los elementos críticos. En estos elementos, los esfuerzos cortantes, axiales y momentos máximos alcanzan valores superiores para el MRT, superando incluso los valores máximos absolutos obtenidos con la aplicación del MEE. Se aprecia además que, son determinantes en el análisis las combinaciones de cargas que consideran acciones sísmicas predominantes en la dirección de los paneles u ortogonales a los mismos, combinadas con cargas gravitatorias máximas o mínimas. Sin embargo, la combinación de carga para la cual predomina la componente sísmica vertical no resulta dominante en el análisis. Se corrobora igualmente un comportamiento estructural asociado a edificaciones con irregularidades en planta como se evidencia en Socarrás y Álvarez (2021a).

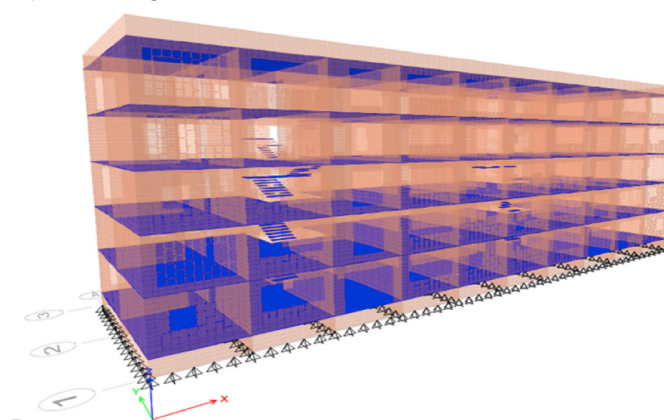
En investigaciones posteriores se aconseja integrar el método de análisis lineal en el tiempo con el método de análisis estático no lineal (*pushover*). Esto permitiría corroborar el nivel de desempeño de la edificación y reservas de capacidad resistente ante sismos que sobrepasen las solicitaciones demandadas por el sismo de cálculo.

## Materiales y métodos

Se elabora un modelo multimasas que refleja las condiciones actuales de explotación del edificio U-142-143 construido con el sistema prefabricado Gran Panel Soviético, para el análisis dinámico por el ETABS versión v18 (CSI, 2018a), partiendo de las propiedades de los materiales, la geometría y vínculos de sus elementos componentes. Los paneles se modelan al igual que las losas, como elementos finitos tipo *shell*, unidos de forma continua entre sí para producir un sistema estructural rígido y homogéneo. Igualmente se modelan las losas de escaleras como elementos finitos tipo *shell* conectadas a los paneles y las losas. Los zócalos se consideran simplemente apoyados en la base corrida de hormigón armado.

El edificio tiene una longitud total de 32 m con 9.60 m de ancho y 14.33 m de altura hasta el borde del pretil de cubierta. Los paneles interiores transversales son de 12 cm de espesor, espaciados a 3.20 m y los interiores longitudinales de 15 cm de espesor, espaciados a 4.80 m. Todos los paneles exteriores en ambos sentidos, en su zona central, tienen 15 cm de espesor, pero en los bordes aumentan a 25 cm. Las losas de entrepiso y cubierta son de espesor 12 cm. En la Figura 2 se aprecia el isométrico del modelo geométrico del edificio y una planta del edificio donde se señala el panel exterior transversal PYK.

a) Modelo geométrico del edificio



b) Planta del edificio y panel transversal PYK

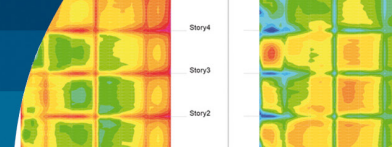


Figura 2: Modelo geométrico y planta del edificio U-142-143

Las juntas entre los elementos panel-panel, losa-loza y panel-loza no fueron explícitamente modeladas y se asumieron como rígidas. Esta condición obedece a que todos los elementos se unen por barras de acero soldadas, donde las juntas son rellenas con hormigón vertido in situ (juntas húmedas). Al mismo tiempo, los bordes de los elementos tienen chavetas, hendiduras, dientes y/o cajuelas.

Las resistencias de los materiales se obtienen de ensayos destructivos y no destructivos al hormigón y al acero, según Tabla 1. Socarrás *et al.* (2020a, 2020b, 2022), detallan





los resultados de los ensayos que se realizaron tanto a elementos que aún están en el área de almacén de la planta de prefabricado como a elementos que están conformando las edificaciones.

Tabla 1: Características de los materiales

Características de los materiales			
Acero	Diámetros, mm	$f_y$ en elementos sin daños patológicos, MPa	$f_y$ en elementos con daños patológicos, MPa
Corrugado	9.5	328.72	205.45
	12	324.43	202.76
Liso	3	948.58	592.86
	6	397.40	248.37
	8	554.62	346.63
	$f'_c$ , MPa	Módulo de deformación $E$ , MPa	
Hormigón prefabricado en elementos sin daños patológicos	16	13536.00	
Hormigón prefabricado en elementos con daños patológicos	12.79	12102.23	
Hormigón relleno de celosía	10.00	10701.14	

El módulo de elasticidad del hormigón prefabricado se calcula por la expresión recomendada por ACI318 (2019), pero con una reducción mayor del 40%, según sugiere Lewicki (1968) para las edificaciones conformadas por paneles prefabricados. Lo anterior está fundamentado en que la técnica de la prefabricación impide lograr el monolitismo completo de la estructura, provocando una disminución de su rigidez. Por otra parte, se incrementa en un 20% por ser la acción sísmica de corta duración, totalizándose una penalización del 28%. El módulo de cortante  $G$  se obtiene del módulo de elasticidad  $E$ , asumiendo para el hormigón un coeficiente de Poisson  $\nu = 0.17$ .

El empleo del análisis lineal obliga a introducir modificadores de rigidez para reflejar el grado de fisuración y de acción inelástica que ocurre en los elementos inmediatamente antes de la fluencia (FEMA 273, 1997; ACI318, 2019); también para visualizar en el modelo estructural la incidencia de las aberturas de los elementos y los daños patológicos presentes. En la Tabla 2 se resumen los modificadores de rigidez a flexión empleados en el modelo estructural calibrado.

En la calibración del modelo se utilizan los períodos de oscilación según las vibraciones ambientales  $T_{VA}$  (Socarrás *et al.*, 2021a; 2021b). Asumiéndose un incremento entre 2-15% los valores de  $T_{VA}$ , como recomienda Socarrás (2020). Por lo tanto, el rango de calibración de los períodos fundamentales del modelo es:  $T_{\text{modelo}} \approx (1.02-1.15) T_{VA}$ . También se redefine la geometría de las secciones de hormigón con daños patológicos, disminuyendo sus espesores un 25 %.

Las cargas permanentes (G) y de utilización (Q) fueron definidas respetando las consideraciones de los proyectos originales. Como cargas permanentes, en la cubierta se consideran tres capas de asfalto gravilla (0.28 kPa); en los entrepisos el relleno de piso (0.18 kPa/cm), el mortero (0.20 kPa/cm) y el mosaico (0.230 kPa/cm). Para las cargas de utilización, en la cubierta se tiene en cuenta el desagüe por tragante (2.00 kPa) y en los entrepisos se suponen habitaciones de viviendas comunes (1.50 kPa). El peso propio de todos los elementos es generado por el software SAP2000 v20 (CSI, 2018b) a partir del peso específico del material (0.25 kPa/cm).

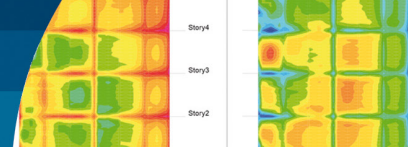
Dentro de las cargas permanentes se añadieron también:

- Tanques de agua en los patios de servicio.
- Muro de mampostería en las áreas multipropósitos.
- Hormigón como relleno de las celosías de algunos paneles exteriores.

Tabla 2: Modificadores de rigidez a flexión en el modelo estructural calibrado

Modificadores de rigidez a flexión							
Zócalos	Paneles long. int.	Paneles long. ext.	Paneles transv. int.	Paneles transv. Ext.	Paneles con daños patológicos	Losas	Losas con daños patológicos
$0.70EI$	$0.35EI$	$0.35EI$	$0.35EI$	$0.35EI$	$0.15EI$	$0.25EI$	$0.10EI$

Nota: Para el relleno de celosías se emplea  $0.15EI$ , porque se asume que ellas aportan una rigidez instantánea



Se modelan primero las cargas sísmicas (S) con el MER, para obtener los períodos fundamentales del análisis modal. Se consideran las tres componentes fundamentales de un sismo, los dos horizontales y la vertical, combinando el 100% de la carga sísmica en una de las direcciones principales, simultáneamente con el 30% en las restantes direcciones. La carga sísmica en la dirección vertical se modela como un incremento de la carga permanente total que incluye el peso propio de la estructura. Este incremento se estima como el 20% de la carga permanente mencionada anteriormente por la aceleración de respuesta para un período corto determinado en el espectro de diseño para el perfil de suelo considerado.

También en cada uno de los pisos se consideraron las excentricidades accidentales de los centros de masas respecto a los centros de rigideces. Para el modelo propuesto se comprueba que los centros de rigidez de cada uno de los pisos coinciden aproximadamente con sus centros de masa, por lo que su posición se asumió igual para todos los pisos. Se utilizó como fórmula de superposición modal la CQC (*Complete Quadratic Combination*).

El espectro de respuesta de diseño utilizado se elaboró para edificios de viviendas construidos en Santiago de Cuba, considerando la ubicación de los edificios estudiados y reducciones de las ordenadas espectrales para la disipación de energía del sistema prefabricado Gran Panel Soviético asumida en la investigación (ver Figura 3). A continuación, se detallan las consideraciones para la elaboración de dicho espectro:

- Zona de peligro sísmico: Muy alto (zona 5) con aceleraciones horizontales máximas del suelo de 0.3g.
- Sismo básico: el cual para períodos de vida útil de 50 años y una probabilidad de excedencia aceptada de un 10% se corresponden con un período de retorno de 475 años del sismo de diseño.
- Tipo de suelo: perfil D.
- Sistema estructural: E2 (Sistema de muros)
- Factor de reducción por ductilidad  $R = 1.5$ , asumiendo respuesta cuasi elástica. Se valora que son estructuras prefabricadas proyectadas por códigos derogados, con poca ductilidad del acero de los elementos estructurales y un detallado inadecuado de las secciones de los elementos.

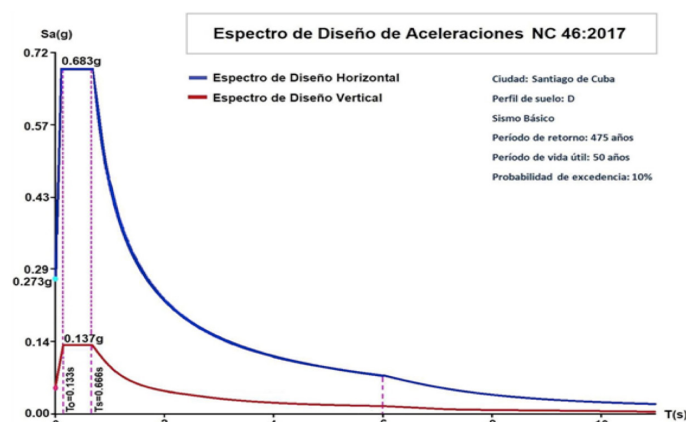


Figura 3: Espectro de diseño para cargas horizontales y verticales

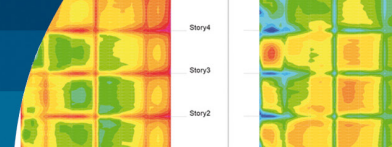
Luego se modelan las cargas sísmicas con el MEE. Para los valores de los períodos fundamentales del análisis modal, se obtienen en la Figura 3, los valores de las ordenadas espectrales  $S_a(T)$ .

Para aplicar el MRT se usan registros sintéticos, a partir de un sismo débil ocurrido en Santiago de Cuba, el 5 de julio de 2010 a las 19:06 hrs, cuyas señales fueron registradas en roca, en la estación Río Carpintero y procesadas con el software SeismoSignal v5.1 (Seismosoft, 2019). Se utilizan las tres componentes de aceleración de este sismo (EW, NS y vertical).

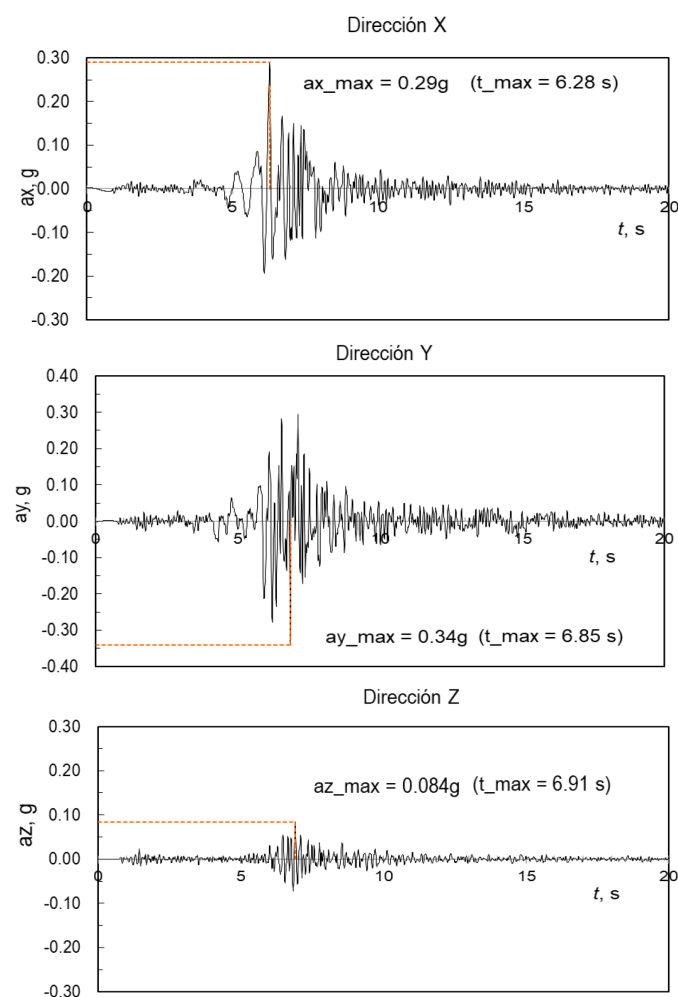
Las componentes son escaladas para el sismo básico, y compatibilizadas según los espectros de respuesta de diseño especificados para edificaciones en perfil de suelo D, a través del software de análisis de terremotos Seismomatch (Seismosoft, 2019). Se usan las propiedades dinámicas obtenidas por el MER, para conocer si las aceleraciones de respuestas del espectro del sismo escalado se corresponden con el espectro de diseño de la NC46 (2017), como se observa en la Figura 4. Las combinaciones de cargas empleadas son:

Combinaciones de cargas de servicio:

- C1:  $G + 0.25Q + S_x + 0.3S_y + 0.3S_z$
- C2:  $G + 0.25Q + 0.3S_x + S_y + 0.3S_z$
- C3:  $G + 0.25Q + 0.3S_x + 0.3S_y + S_z$
- C4:  $G + S_x + 0.3S_y + 0.3S_z$
- C5:  $G + 0.3S_x + S_y + 0.3S_z$
- C6:  $G + 0.3S_x + 0.3S_y + S_z$
- C7:  $G + Q$



#### a) Acelerogramas en la base



#### b) Espectros de diseño versus espectros de respuesta

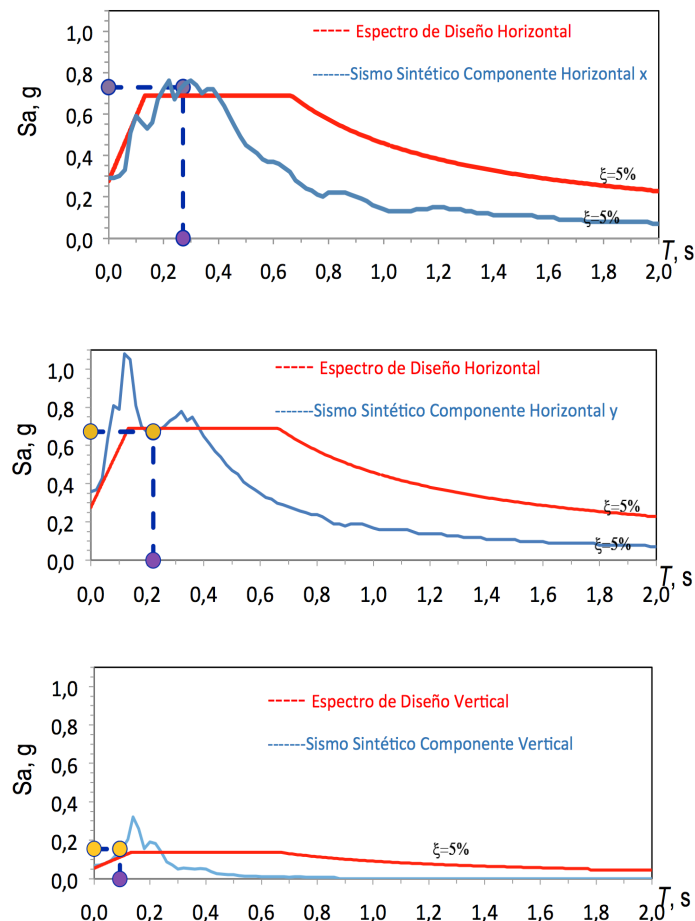


Figura 4: a) Acelerogramas escalados del sismo de Santiago de Cuba, perfil de suelo D y b) espectros de aceleraciones de respuestas en el dominio de los períodos fundamentales del edificio.

Combinaciones de cargas mayoradas:

- C8:  $1.2G + 0.25Q + S_x + 0.3S_y + 0.3S_z$
- C9:  $1.2G + 0.25Q + 0.3S_x + S_y + 0.3S_z$
- C10:  $1.2G + 0.25Q + 0.3S_x + 0.3S_y + S_z$
- C11:  $0.9G + S_x + 0.3S_y + 0.3S_z$
- C12:  $0.9G + 0.3S_x + S_y + 0.3S_z$
- C13:  $0.9G + 0.3S_x + 0.3S_y + S_z$
- C14:  $1.2G + 1.6Q$

Para el análisis de las zonas críticas del edificio, se confeccionan grupos (en el sentido longitudinal y transversal) para controlar las tensiones que se presentan; se nombran según los ejes en planta de la edificación. Las tensiones normales y tangenciales extremas se obtienen a partir de la envolvente de combinaciones de cargas de cálculo de tensiones, por el MER y el MRT.

## Resultados y discusión

En la Tabla 3 se muestran las magnitudes de respuesta de la edificación en condiciones actuales de explotación, obtenidas con la aplicación del MEE y el MER. En el caso de los períodos fundamentales según el análisis modal, se aprecia que estos superan los valores de  $T_{VA}$  y los valores empíricos ofrecidos por Polyakov (1974) y Oliva (2001). También estos valores de períodos, aumentan en relación a los valores que se obtienen en el edificio según el proyecto original estudiado por Socarrás (2020). Se considera que estos aumentos de los períodos se deben tanto a la disminución de rigideces por la presencia de daños patológicos, como al incremento del peso sísmico.

Asimismo, cuando se comparan los cortantes basales resumidos en la Tabla 3 con los obtenidos por Socarrás (2020), se observa que hay aumentos ligeros en la variante actual.



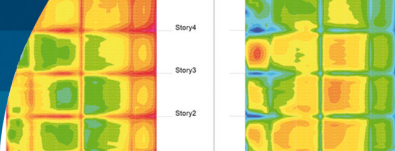


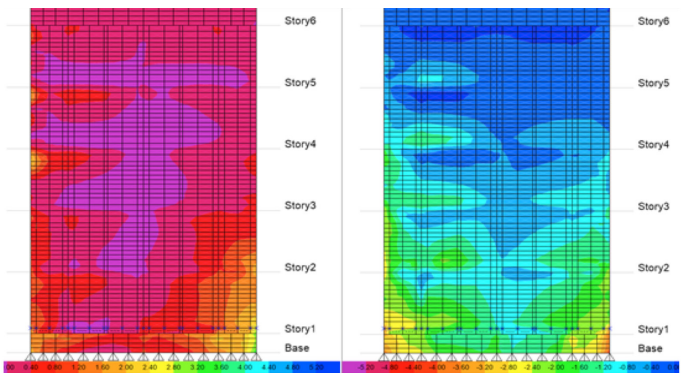
Tabla 3: Magnitudes de respuesta estructural en la variante actual del edificio U-142-143.

Magnitudes de respuestas			Método de cálculo		
			MEE	MER	MER (85% del MEE según NC 46, 2017)
Peso del edificio, kN	20 198.15	Cortante basal longitudinal, kN	9 291.15	7 573.40	7 897.60
Período longitudinal, s	0.270	Cortante basal transversal, kN	9 291.15	6 847.20	7 897.60
Período transversal, s	0.221	Coefficiente sísmico longitudinal	0.46		
Período de torsión, s	0.188	Coefficiente sísmico transversal	0.46		

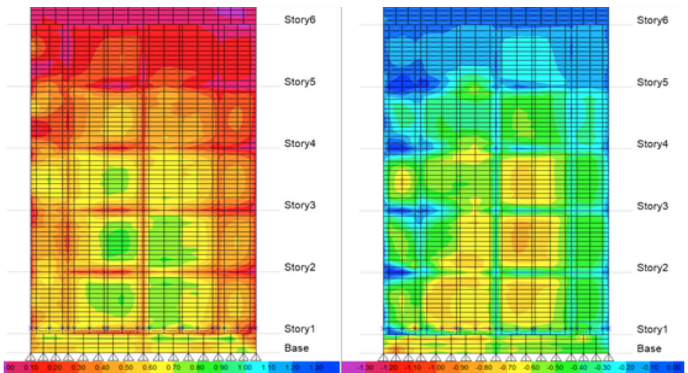
Estos cortantes basales longitudinales y transversales, aumentan por el incremento del peso sísmico, no por el incremento de los períodos longitudinales y transversales; porque estos son mayores que el período de esquina ( $T_1$ ) y se mantienen en la meseta del espectro. Por eso los coeficientes sísmicos por el MEE, se mantienen constantes en la dirección longitudinal y transversal.

Del análisis de las zonas críticas, se obtuvo que en los paneles transversales exteriores (PYK y PYA) se concentran los mayores rangos de tensiones normales y tangenciales, máximas y mínimas. En relación a la variante original estudiada en Socarrás y Álvarez (2021b), se observa que se incrementan estos rangos de tensiones y que se acrecientan las áreas con máximas tensiones absolutas. En este análisis se obtuvieron iguales resultados por los métodos MER y MRT (ver Figura 5). En la Tabla 4 se muestra el rango de tensiones extremas.

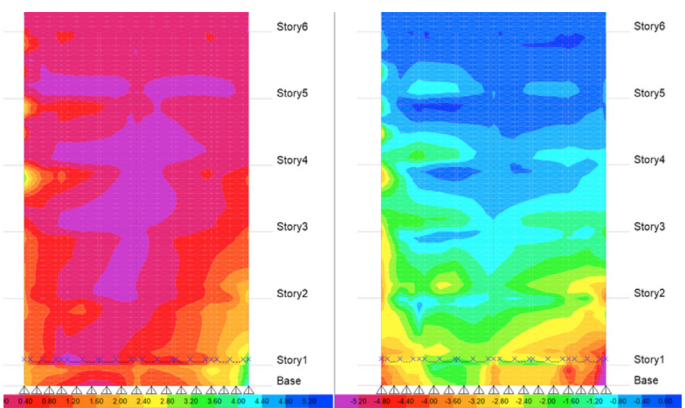
a) Envoltentes de tensiones normales S22max - S22min por el MER



b) Envoltentes de tensiones tangenciales S12max- S12min por el MER



c) Envoltentes de tensiones normales S22max- S22min por el MRT



d) Envoltentes de tensiones tangenciales S12max-S12min por el MRT

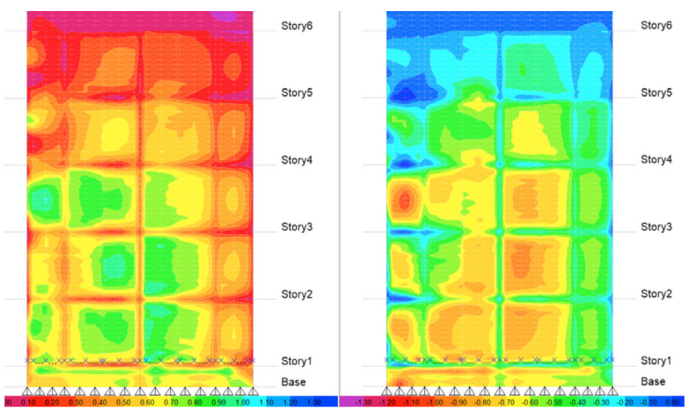


Figura 5: Comparaciones de las envoltentes de tensiones por el MER y MRT en el Panel PYK en la variante actual del edificio U-142-143.

Tabla 4. Rango de tensiones extremas en la variante actual del edificio U-142-143

Ejes 1, 2*, 3	Tangenciales	Máximas	0.00 a 2.00 MPa
		Mínimas	-2.40 a 0.00 MPa
	Normales	Máximas	0.00 a 2.80 MPa
		Mínimas	-4.80 a 0.00 MPa*
Ejes A, K	Tangenciales	Máximas	0.00 a 1.30 MPa
		Mínimas	-1.00 a 0.00 MPa
	Normales	Máximas	0.00 a 4.00 MPa
		Mínimas	-4.80 a 0.00 MPa
Ejes I**, J	Tangenciales	Máximas	0.00 a 1.80 MPa
		Mínimas	-3.20 a 0.00 MPa**
	Normales	Máximas	0.00 a 2.80 MPa
		Mínimas	-2.80 a 0.00 MPa

\* Máximos absolutos de tensiones normales en bordes superiores o inferiores de paneles del 1er nivel.

\*\*Máximos absolutos de tensiones tangenciales en vigas de acople, hasta el cuarto nivel.

Específicamente, en esos ejes transversales A y K, los valores máximos absolutos de tensiones normales y tangenciales, se localizan en áreas extensas de paneles de los dos primeros niveles, decreciendo a zonas puntuales hasta el cuarto nivel. Estos resultados están en correspondencia con las aportaciones de Polyakov (1974) y FEMA P-154 (2015), en relación a las zonas de aparición de los daños sísmicos potenciales en las estructuras de hormigón prefabricado a base de grandes paneles. Polyakov (1974) y el reporte FEMA-154 (2015) puntualizan que en este tipo de estructuras aparece el agrietamiento de los paneles, fundamentalmente en el primer nivel y alrededor de los vanos y vigas de acople, junto a fisuras en las juntas horizontales y verticales, incluyendo el astillamiento en las juntas entre los paneles y la cimentación.

En otras investigaciones también se fundamenta la aparición desde daños menores hasta la posibilidad del colapso, en paneles y juntas, del 1er nivel. Belleri *et al.* (2014) enfatizan en la pérdida de rigidez de estas estructuras ante las cargas sísmicas, con el desarrollo y propagación de grietas, al igual que la fluencia y falla en las conexiones de las juntas prefabricadas. Henry *et al.* (2021), como resultado de un programa experimental, observaron agrietamiento y astillado en la parte inferior de los paneles; aunque aclaran que fueron daños menores que no comprometieron la capacidad o integridad de la estructura y que pueden repararse fácilmente con una interrupción mínima.

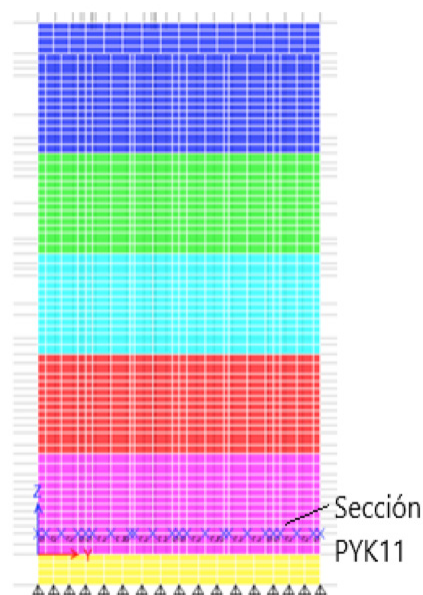
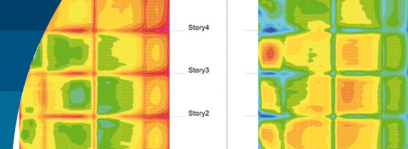


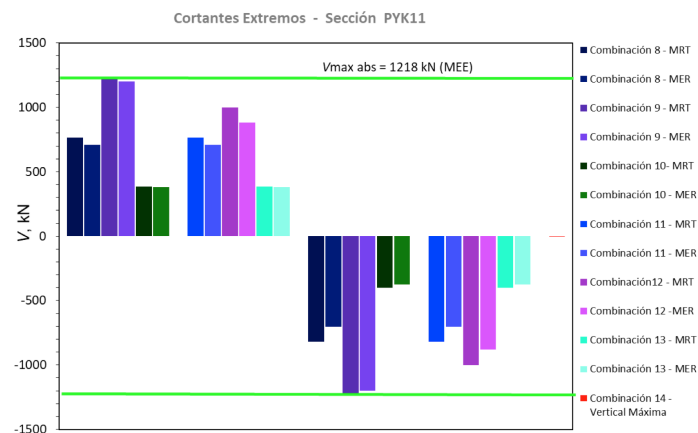
Figura 6: Ubicación de la sección PYK11 en el panel PYK

Al compararse las solicitaciones obtenidas para las secciones críticas de los paneles transversales de los ejes A y K, se observa que los máximos valores de cortante se alcanzan en el panel PYK. En la Figura 6 se muestra la sección crítica de este panel PYK, que se denomina como PYK 11. En dicho panel, como se aprecia en la Figura 7, para todas las combinaciones de carga, los valores de solicitaciones obtenidos a través del MRT superan los valores por el MER, excepto para la combinación donde predomina la componente sísmica vertical, que no resulta dominante en el análisis. Para la combinación 9, se alcanzan los mayores valores de cortante, que llegan a superar el valor de cortante estático máximo absoluto, pero como al mismo tiempo los axiales son de compresión, se favorece el cortante. Para las combinaciones 8 y 11, se alcanzan valores menores de cortante, pero los axiales son de tracción. Se corroboran las irregularidades que posee la edificación, al valorarse que para el panel PYK que está ubicado en la dirección transversal de la edificación, aparecen cortantes máximos a causa de combinaciones de carga que actúan en esa misma dirección como la combinación 9. También aparecen cortantes no desestimables originados por las combinaciones 8 y 11 que actúan en la dirección longitudinal (ver Figura 8).

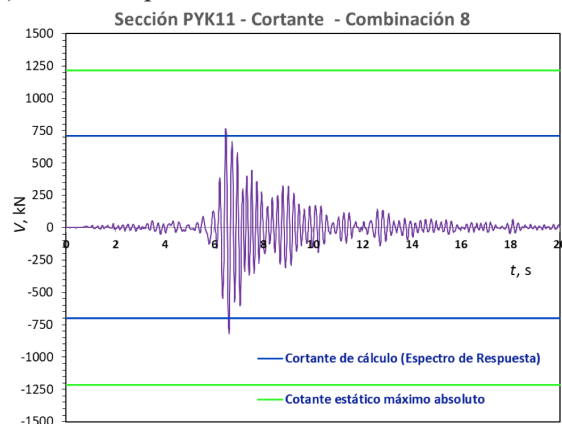




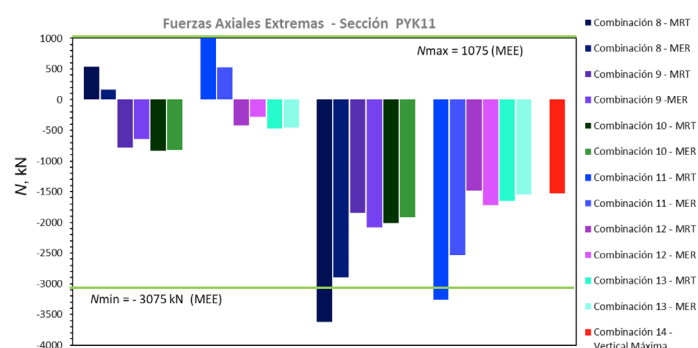
### a) Cortante en la sección PYK11



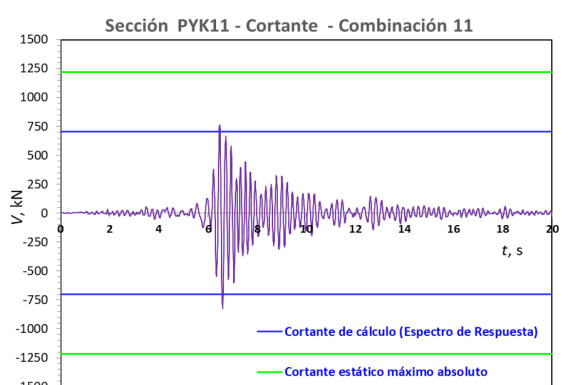
### a) Cortantes para la combinación 8



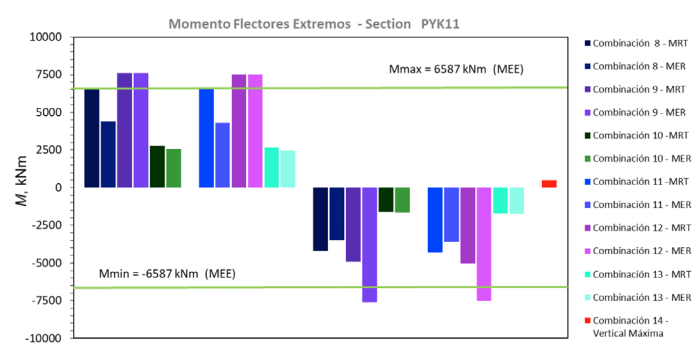
### b) Fuerzas axiales en la sección PYK11



### b) Cortantes para la combinación 11



### c) Momento flector en la sección PYK11



### c) Cortantes para la combinación 9

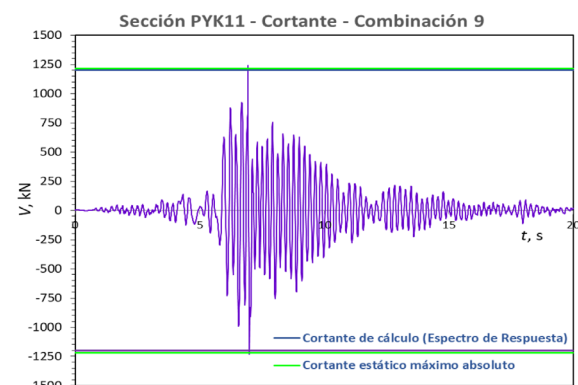


Figura 7: Comparación de las solicitaciones de cálculo en la sección PYK11 obtenidas por el MEE, MER y MRT para diferentes combinaciones de carga

A la misma conclusión se arriba, al apreciarse en la Figura 9, que para las combinaciones 8 y 11, ocurren ciclos de carga y descarga del panel, alcanzándose los mayores valores de axiales de compresión, superando incluso el máximo valor estático, en la combinación 8 y donde también el panel trabaja a esfuerzos axiales de tracción. Sin embargo, para la combinación 9 también se originan axiales de compresión, que representan un 66.66 % del axial estático.

### d) Cortantes para la combinación 10

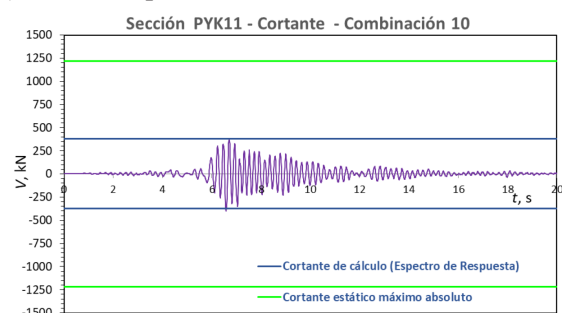
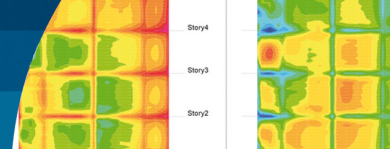
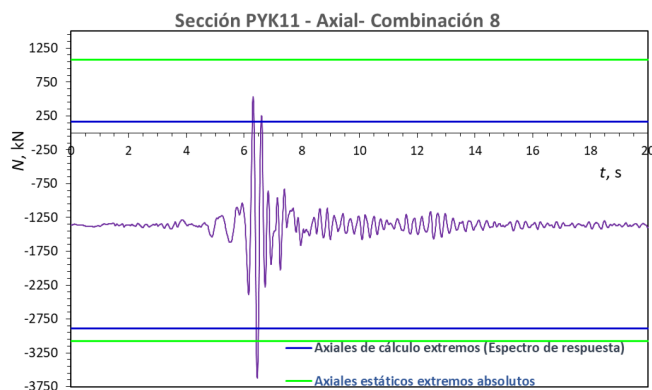


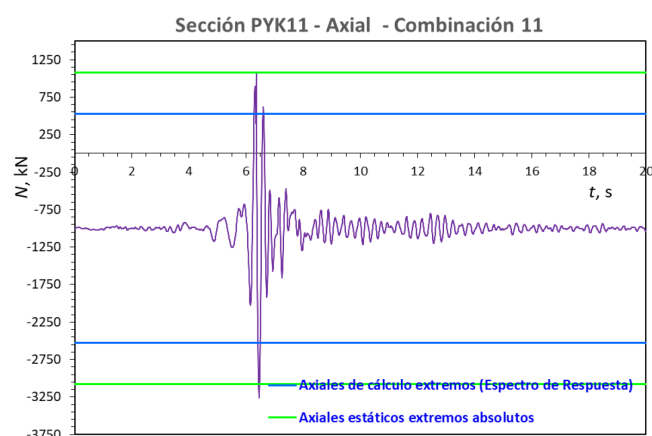
Figura 8: Comparación de registro en el tiempo de los cortantes de cálculo en la sección PYK11 para diferentes combinaciones de cargas



#### a) Axiales para la combinación 8



#### b) Axiales para la combinación 11



#### c) Axiales para la combinación 9

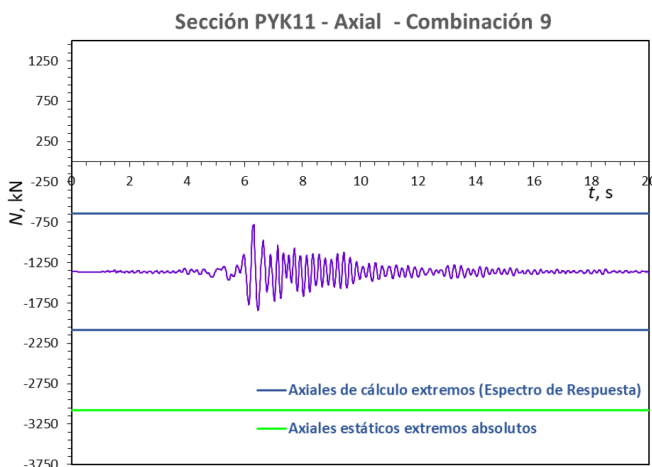


Figura 9: Registro en el tiempo de los axiales de cálculo en la sección PYK11 para distintas combinaciones de carga

Los registros en el tiempo de las solicitaciones de cálculo en la sección crítica PYK11, permiten corroborar, cuantas veces se repiten sus valores máximos durante la actuación del sismo de cálculo compatible con el espectro de diseño.

En la Figura 10 se observa que para la combinación 8, se iguala dos veces el momento flector estático, y en la Figura 9a se aprecia que se supera dos veces el axial estático de compresión, esto último favorece al cortante, que no llega nunca a alcanzar el cortante estático. Para la combinación 11, al valorarse la Figura 8b y 9b, se obtiene un comportamiento similar.

No obstante, no se puede descartar un fallo por cortante en el plano, aunque se supone que la demanda de ductilidad inferida en esta zona crítica, probablemente pueda verificarse. Dicha ductilidad es decisiva en el comportamiento sísmico adecuado de estos paneles, como explican Ujianto *et al.* (2019). Así se favorece el daño por flexión y no por cortante.

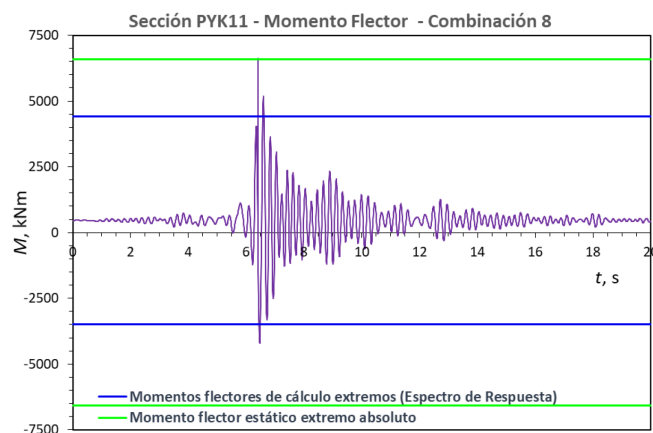
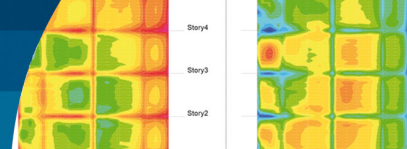


Figura 10: Registro en el tiempo de las solicitaciones de momento flector en la sección PYK11 para la combinación 8

En estos elementos, los esfuerzos cortantes, axiales y momentos máximos alcanzan valores superiores para el MRT, superando incluso los valores máximos absolutos obtenidos con la aplicación del MEE. Este comportamiento está asociado a las irregularidades que tiene la edificación declaradas en Socarrás y Álvarez (2021a). Sin embargo, en edificaciones regulares, Salas y Hernández (2021) demuestran que el MEE produce mayores solicitaciones en relación al MER.

En esta investigación se aprecia además que, son determinantes en el análisis las combinaciones de cargas que consideran acciones sísmicas predominantes en la dirección de los paneles u ortogonales a los mismos, combinadas con cargas gravitatorias máximas o mínimas. Sin embargo, la combinación de carga para la cual predomina la compo-



nente sísmica vertical no resulta dominante en el análisis. Todo esto conlleva también a corroborar el comportamiento estructural asociado a edificaciones con irregularidades en planta como se planteó anteriormente, que se evidencia en Socarrás y Álvarez (2021a).

## Conclusiones

Es conveniente la integración de los procedimientos de análisis de la fuerza sísmica, como una vía de aprovechar las ventajas de los métodos existentes y superar sus limitaciones. En esta investigación se emplearon de conjunto, el Método Estático Equivalente MEE, Método Espectro de Respuesta MER y el Método de Registro en el Tiempo MRT. La obtención de las solicitaciones de cálculo en los elementos críticos del edificio U-142-143, construido con el sistema prefabricado Gran Panel Soviético en la ciudad de Santiago de Cuba, permitió validar el análisis estructural. Los elementos críticos se definieron de acuerdo al análisis de los mapas de tensiones normales y tangenciales, así como de acuerdo a las solicitaciones resultantes en las secciones transversales definidas en el modelo estructural. Del estudio realizado, los elementos críticos resultaron ser los paneles exteriores transversales. En estos elementos, los esfuerzos cortantes, axiales y momentos máximos alcanzaron valores superiores para el MRT, superando incluso los valores máximos absolutos obtenidos con la aplicación del MEE. Se apreció además que, son determinantes en el análisis las combinaciones de cargas que consideran acciones sísmicas predominantes en la dirección de los paneles u ortogonales a los mismos, combinadas con cargas gravitatorias máximas o mínimas. Sin embargo, la combinación de carga para la cual predomina la componente sísmica vertical no resultó dominante en el análisis. Todo esto conlleva a corroborar un comportamiento estructural asociado a edificaciones con irregularidades en planta.

## Referencias

ACI318 (2019). Building code requirements for structural concrete. American Concrete Institute ACI. Washington DC, USA

Belleri, A., Moaveni, B. and Restrepo, J.I. (2014). Damage assessment through structural identification of a three-story large-scale precast concrete structure. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **43**(1), 61-76

CSI (2018a). ETABS v18. Computers & Structures, Inc. CSI. Structural and earthquake engineering software. USA

CSI (2018b). Structural analysis program SAP2000 v20. Integrated software for structural analysis and design. Computers & Structures, Inc. CSI. Structural and earthquake engineering software. USA

Devecsery, D., Chen, P.M., Flinn, J. and Narayanasamy, S. (2018). Optimistic hybrid analysis: accelerating dynamic analysis through predicated static analysis. *Twenty-Third International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems*, Williamsburg VA, USA, 348-362

FEMA P-154 (2015). Rapid visual screening of buildings for potential seismic hazards: A Handbook. Federal Emergency Management Agency FEMA. Washington DC, USA

FEMA 273 (1997). NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency FEMA, Washington DC, USA

Henry, R.S., Zhou, Y., Lu, Y., Rodgers, G.W., Gu, A., Elwood, K.J. and Yang, T.Y. (2021). Shake-table test of a two-storey low-damage concrete wall building. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics* **50**(12), 3160-3183

Herrera, I., Vielma, J.C., Ugel, R. y Martínez, Y. (2012). Evaluación del comportamiento sismorresistente y diseño óptimo de un edificio existente de concreto armado de baja altura. *Revista Ingeniería UC* **19**(3), 52-65

Lewicki, B. (1968). *Edificios de viviendas prefabricadas con elementos de grandes dimensiones*. Arkady, Polonia

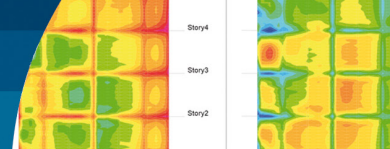
Medina, C. y Galarza, D. (2020). Análisis sísmico comparativo de una estructura irregular torsionalmente flexible aplicando NSP, MPA, NLRHA. *Revista Ingeniería de Construcción* **35**(3), 257-274

NC46 (2017). Construcciones sismo resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Comité Estatal de Normalización, La Habana, Cuba

Oliva, R. (2001). Determinación experimental del periodo fundamental de vibración de estructuras para la evaluación de la vulnerabilidad en Cuba. Grupo de Ingeniería Sísmica. Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Cuba

Pinzón, O.E. (2015). Análisis no lineal de edificaciones. Conceptos básicos e implicaciones. *3er Simposio de Ingeniería de Materiales y Estructuras*, Bogotá, Colombia





- Polyakov, S. (1974). *Design of earthquake resistant structures*. MIR Publishers, Moscow, USSR
- Salas, A. y Hernández, A. (2021). Análisis comparativo entre el método estático equivalente y el método de análisis modal en estructuras regulares de muros portantes de hormigón armado. *Revista de Arquitectura e Ingeniería* **15**(1), 1-8
- Seismosoft (2019). Earthquake software for signal processing of strong-motion data. Seismosignal v5.1, Seismomatch. Earthquake engineering seismic solutions.
- Socarrás, Y.C. (2020). *Procedimiento para la evaluación de daños sísmicos potenciales en el sistema prefabricado Gran Panel Soviético*. Tesis doctoral, Universidad de Oriente, Cuba
- Socarrás, Y.C. y Álvarez, E.R. (2021a). Vulnerabilidad sísmica del sistema estructural prefabricado gran panel Soviético en edificios deteriorados y transformados. *Obras y Proyectos* **30**, 60-73
- Socarrás, Y.C. y Álvarez, E.R. (2021b). Zonas críticas en edificaciones construidas con el Gran Panel Soviético. Análisis estructural versus Diagnóstico. *II Convención Internacional Ciencia y Conciencia*. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba
- Socarrás-Cordoví, Y.C., González-Díaz, L., Alvarez-Deulofeu, E., González -Fernández, M.M., Roca-Fernández, E. and Torres-Shoembert, R. (2020a). Valuation of the durability of the concrete used in the precast Great Soviet Panel System. *Revista Facultad de Ingeniería* **29**(54), e10486
- Socarrás, Y.C., González, L., Alvarez, E., González, M.M. y Roca, E. (2020b). Evaluación de la calidad del hormigón en edificaciones construidas con el sistema prefabricado gran panel soviético. *Tecnología Química* **40**(2), 264-277
- Socarrás, Y., Álvarez, E. and Lora, F. (2021a). Changes in the fundamental periods of buildings constructed with the Great Soviet Panel. *ESTOA* **10**(19), 220-235
- Socarrás, Y., Álvarez, E. and Lora, F. (2021b). Forecasts on the seismic behavior of buildings constructed with the Great Soviet Panel. *DYNA* **88**(216), 145-151
- Socarrás-Cordoví, Y.C., González-Díaz, L., Álvarez-Deulofeu, E. (2022). Significant reductions in the area in corroded steel and its repercussion in prefabricated large-panel buildings. *Revista Facultad de Ingeniería* **31**(59), e13110
- Ujianto, M., Mohd Ali, A.Z. and Solikin, M. (2019). Structural behavior of precast concrete wall panels due to dynamic load: A review. *AIP Conference Proceedings* 2114(1), 050013