

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE TIPOLOGÍAS ESTRUCTURALES NO CONVENCIONALES EN PROYECTOS EN ZONA SÍSMICA

Silvina Inés Prados ¹
Yohana Elizabeth Cicaré ²
Katya LlopJoeques ³

RESUMEN

Los desafíos estructurales que se plantean a partir de las tendencias arquitectónicas actuales, nos motivan a reflexionar sobre las capacidades o criterios adquiridos durante la formación de grado del arquitecto al seleccionar las herramientas y metodologías de análisis a aplicar para su correcta evaluación. Esto sobre todo se evidencia al estudiar mecanismos sismoresistentes utilizando métodos simplificados como el estático equivalente propuesto por el reglamento para las construcciones ubicadas en zonas con riesgo sísmico.

Los procedimientos simplificados de análisis son herramientas de comprobación del comportamiento estructural previsible, según parámetros de diseño, a lo largo de la vida útil de una construcción y su nivel de aproximación al comportamiento real dependerá siempre del criterio del proyectista.

En el siguiente trabajo se analiza un edificio construido poniendo de manifiesto los alcances de los métodos aprendidos durante la formación académica del arquitecto.

PALABRAS CLAVE

Diseño estructural; Estructura sismorresistente; Arquitectura

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF NON CONVENTIONAL STRUCTURAL TYPOLOGIES IN PROJECTS IN SEISMIC AREAS

ABSTRACT

The structural challenges that arise from the current architectural trends motivate us to reflect on the skills or criteria acquired during the degree of architecture, when selecting the tools and methodologies of analysis to apply for their correct evaluation.

This turns especially evident with the study of seismic mechanisms using simplified methods such as the static equivalent proposed by the regulation for buildings located in areas with seismic risks.

Simplified analysis procedures are tools for checking for predictable structural behavior, according to design parameters, over the life of a building and its level of approximation to actual behavior will always depend on the criteria of the designer.

In the following text, a building is analyzed showing the scope of the methods learned during the academic training of the architect.

KEYWORDS

Structural design; Earthquake structure; Architecture

¹ Ingeniera Civil. Actualmente cursando la Especialización en diseño estructural de obras de arquitectura. Profesora titular por concurso de la cátedra de Estructuras IIB de la FAUD-UNC. Docente investigadora desde el año 2007 a la fecha de proyectos acreditados y subsidiados por SECyT-UNC.

² Arquitecta. Actualmente cursando la Especialización en diseño estructural de obras de arquitectura. Adscripta en la cátedra de Estructuras IIB de la FAUD-UNC. Investigadora desde el año 2014 a la fecha de proyectos acreditados y subsidiados por SECyT-UNC.

³ Arquitecta. Actualmente cursando la Especialización en diseño estructural de obras de arquitectura. Adscripta en la cátedra de Estructuras IV de la FAUD-UNC.

Introducción

El siguiente artículo presenta el desarrollo del trabajo realizado durante el cursado de los módulos “Tipologías estructurales frecuentes” y “Sismorresistencia - Mitigación de desastres” de la “Especialización en Diseño Estructural de Obras de Arquitectura” (FAUD & FCEfYN - UNC⁴), en los que se requirió el análisis de un edificio en altura ya construido para el ensayo de los contenidos específicos de dichas asignaturas. El equipo de trabajo se integró por dos arquitectas y una ingeniera posibilitando un trabajo interdisciplinar.

El edificio seleccionado es “El Cubo” (Figura 1), de uso residencial y 50 metros de altura, proyectado por el estudio holandés Orange Architects que se encuentra ubicado en la ciudad de Beirut en el Líbano y cuya construcción finalizó en el año 2015. Ganador del premio al mejor edificio alto 2016 de Medio Oriente y África concedido por el consejo sobre edificios altos y hábitat urbano (CTBUH). La configuración estructural no convencional en su perímetro que permite la liberación de visuales en sus 4 caras y el desarrollo de tipologías libres, fue el principal motivo de su elección. La misma se materializa a partir del apilamiento de pares de vigas viéndose de paralelas alternando su dirección en 90° piso a piso.

A lo largo del trabajo se evaluaron diferencias en el comportamiento del edificio frente a las acciones sísmicas entre distintas metodologías de análisis, las simplificadas estudiadas durante la formación de grado y otras más precisas, permitiendo apreciar sus alcances al estudiar este tipo de arquitectura.



Fig. 1: Edificio El Cubo - Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl>

⁴ Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño y Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba

Descripción de la arquitectura

La idea generadora de esta torre parte de la rotación de volúmenes alrededor del núcleo central de circulación vertical, logrando así crear una imagen de apilamiento “descentrado”. Esta rotación a 90° genera que la fachada cambie nivel a nivel (Figura 2), intercalando un plano acristalado de casi 12 metros de ancho con otro más cerrado, blanco con grandes perforaciones irregulares de piso a techo.

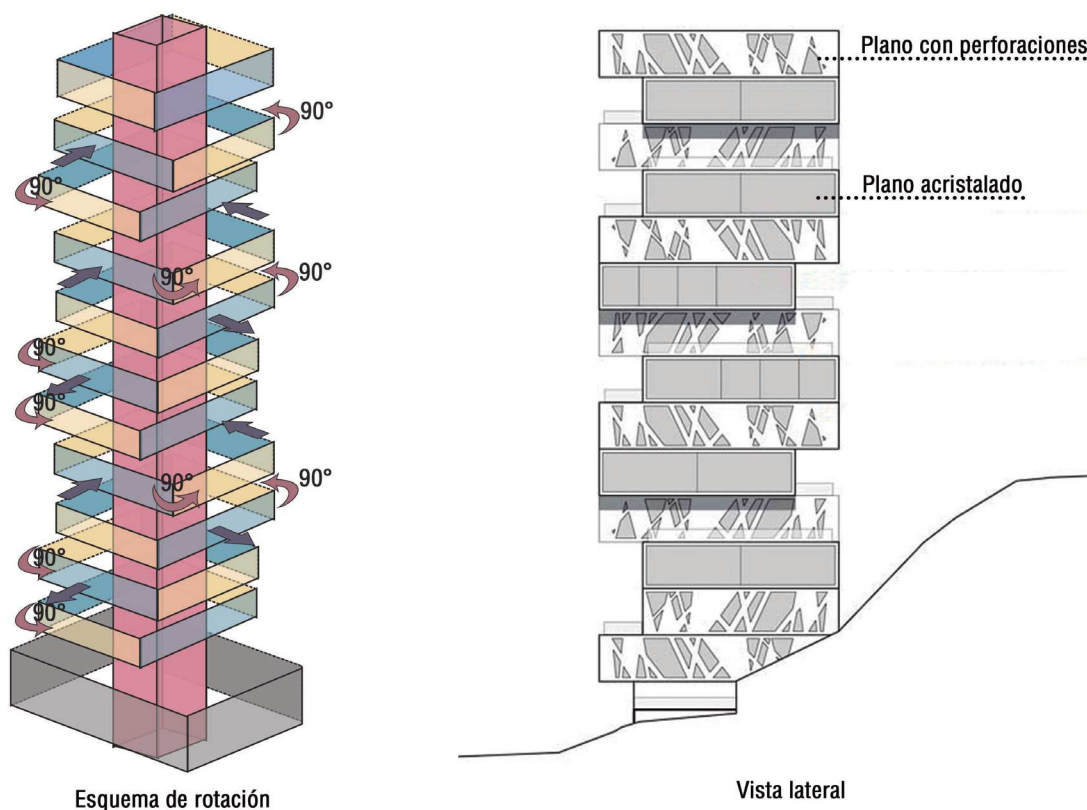


Fig. 2: Idea generadora. Fachada - Fuente: elaboración propia y <http://www.orangearchitects.nl/>

Este tipo de configuración permite que el edificio cuente con vistas panorámicas a 360° hacia el paisaje urbano y el mar Mediterráneo y amplias terrazas en altura para todos los departamentos.

La torre, implantada en un terreno con gran desnivel topográfico, consta de 14 niveles. La planta es cuadrada de 15 metros de lado y posee 19 departamentos que varían su superficie de 117 a 234 m² (Figura 3) dependiendo si se trata de medio piso (planta en C) o de piso completo (planta en O).

Debido a la centralización del núcleo de circulación se logra gran libertad en la organización de las tipologías configurándose las plantas desde el centro hacia las fachadas, ubicando los servicios -áreas húmedas- cercanas al núcleo para optimizar de esta manera el diseño de las instalaciones y los espacios técnicos.

En planta baja se encuentra el ingreso, enmarcado por un gran volumen en voladizo y por debajo tres niveles de subsuelo para cocheras.



Fig. 3: Tipologías e interiores - Fuente: <http://www.orangearchitects.nl/>

Descripción de la estructura

La estructura se materializa completamente en hormigón armado blanco. Su configuración es de “tubo en tubo”, liberando la planta de la presencia de columnas. El tubo central es ciego de grandes proporciones con respecto a la planta, ocupando el 15% de su superficie total, y el perimetral de fachada posee una configuración no convencional, ligero, compuesto por el apilamiento de vigas vierendeel enfrentadas (Figura 4).

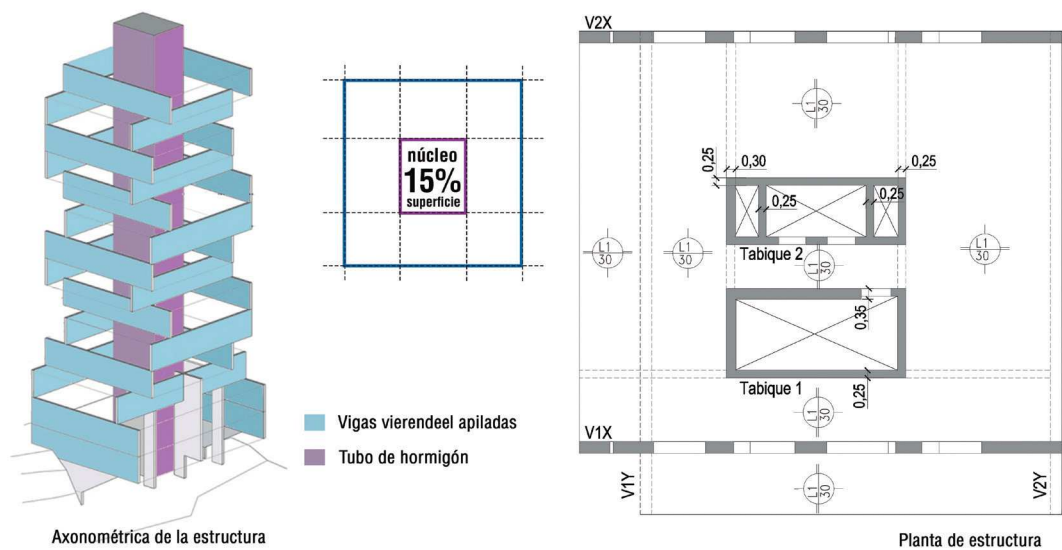


Fig. 4: Organización estructura - Fuente: elaboración propia y <http://www.orangearchitects.nl/>

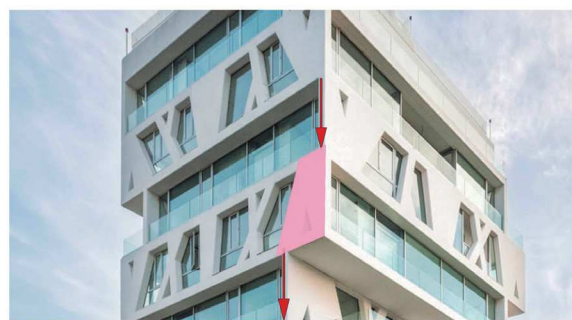
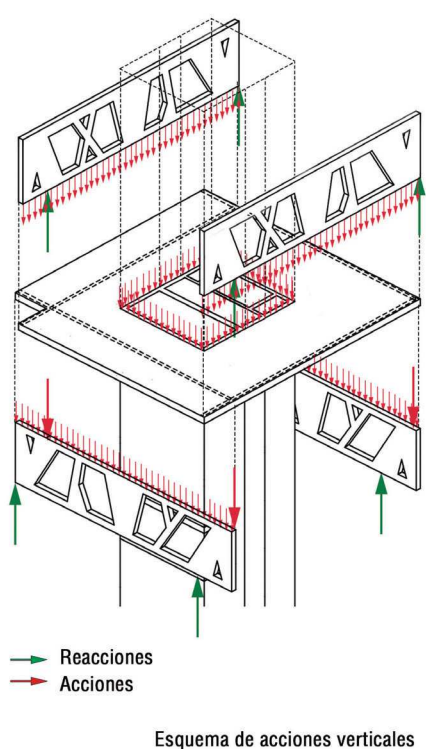
Analizar espacialmente el edificio permitió determinar cualitativamente los mecanismos resistentes a fuerzas verticales y horizontales y definir los métodos de análisis convenientes para evaluar la eficiencia de su comportamiento.

• **Mecanismo resistente a fuerzas verticales:**

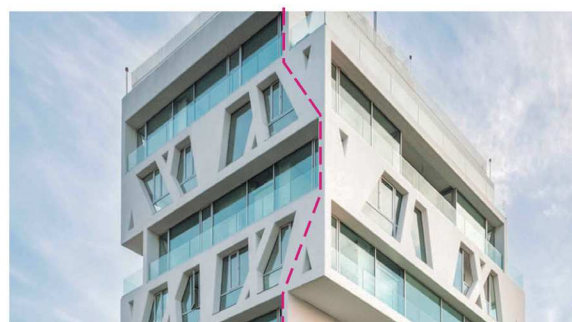
Las losas se resuelven macizas de 30cm de espesor con luces no mayores a los 5 metros y vuelos que no superan los 2,50 metros y refuerzos de vigas contenidas en su espesor resueltas ambas con armadura postesada. La transferencia de cargas hasta las fundaciones está garantizada por el núcleo central y el tubo perimetral donde, en dos lados la losa apoya por encima de las vigas vierendeel y en los opuestos por debajo (Figura 5). Esta organización de la fachada garantiza la continuidad estructural para acciones gravitatorias en toda su altura verificando el equilibrio.

No obstante, la transmisión de las acciones en este perímetro no es directa ya que su configuración no admite la materialización de columnas en las esquinas que posibilitaría una configuración convencional de planos verticales como por ejemplo los pórticos.

En las transiciones entre los planos resistentes de fachada localizados en los encuentros entre vigas se mejora su resistencia macizando la estructura y consecuentemente, optimizando su comportamiento frente a las cargas verticales (Figura 5).



Llenos en los encuentros de vigas



Transmisión indirecta de las cargas

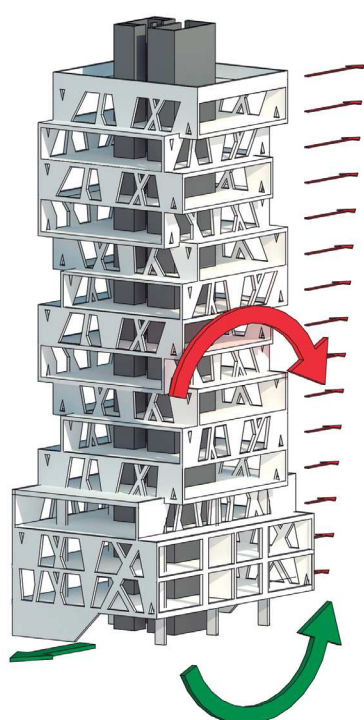
Fig. 5: Mecanismo resistente a acciones verticales - Fuente: <http://www.orangearchitects.nl/> y elaboración propia

Como para las acciones verticales el mecanismo relevado y descrito es claro, correcto y coherente con el diseño arquitectónico es posible evaluarlo mediante los métodos habituales y herramientas dictadas durante el grado. En estos métodos, con la aplicación de coeficientes que consideran la esbeltez geométrica de los elementos y el trazado de áreas tributarias para determinar las acciones actuantes y las resistencias requeridas, es posible definir seccionalmente los distintos elementos que componen el sistema resistente.

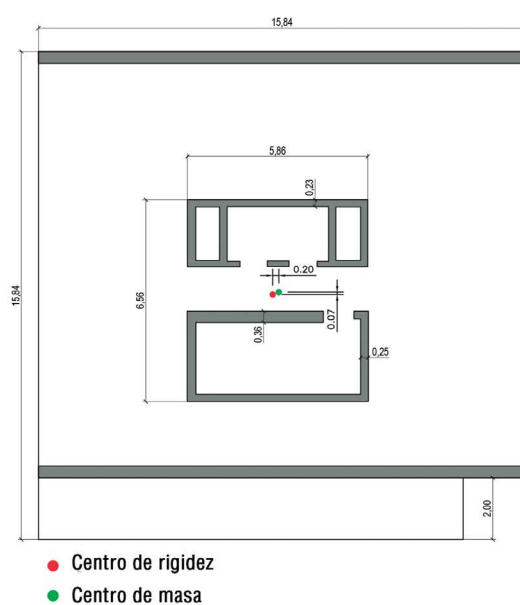
- **Mecanismo resistente a fuerzas horizontales:**

Beirut se encuentra en una región de elevada sismicidad por lo que se considera que la acción horizontal es la preponderante para su diseño. El momento de vuelco y el corte generado por las acciones horizontales equivalentes, producto de la aceleración sísmica, sólo son resistidas por el tubo central de hormigón armado que posee continuidad en toda la altura de la torre y una vinculación directa con el sistema de fundaciones profundas mediante pilotes (Figura 6).

Los espesores de los tabiques varían, entre 20cm y 36cm, reflejando la búsqueda de los proyectistas de un diseño eficiente que minimice los efectos torsionales al aproximar significativamente el centro de masa y el centro de rigidez (Figura 6).



Mecanismo resistente a acciones horizontales



Excentricidad relevada

Fig. 6: Organización estructura - Fuente: elaboración propia y <http://www.orangearchitects.nl/>

Las discontinuidades de los planos rígidos -vigas viendeel- de la fachada, según el reglamento INPRES -CIRSOC 103, caracterizan al edificio como irregular en altura.

Estudio del mecanismo resistente a fuerzas horizontales

En este caso se emplearon dos métodos de análisis y compararon la veracidad de sus resultados y el alcance de cada metodología como herramientas de verificación del comportamiento estructural en diseños con configuraciones innovadoras.

- **Método estático equivalente**

Este primer procedimiento aplicado corresponde al estudiado durante la formación de grado. El método estático consiste en la representación de la acción sísmica mediante un sistema de fuerzas estáticas equivalentes paralelas a la dirección analizada y proporcionales a las masas de cada nivel y a una forma supuesta del primer modo de vibración.

Este método simplificado presenta las siguientes limitaciones:

- Según el uso del edificio se fija la altura máxima del mismo para su aplicación. En nuestro caso por ser un edificio de vivienda o categoría B la limitación es 50 metros: el método es APLICABLE para el estudio de nuestro edificio.
- La estructura debe tener una configuración regular en la distribución de sus masas en planta y en altura: el método es APLICABLE en nuestro caso ya que el centro de masas coincide siempre con el centro geométrico de la planta sin manifestar excentricidades en elevación.
- La estructura debe tener una configuración regular en la distribución de sus rigideces en planta y en altura: el método NO ES APLICABLE si se considera la estructura de fachada ya que la rigidez piso a piso disminuye abruptamente. Es por eso que para poder aplicar este método se desprecia la contribución de la misma en el mecanismo resistente del edificio.

Para comenzar el estudio, se adopta simplificadaamente, la vibración de 16 masas (Figura 7) incluyendo la estimada para el tanque de agua empotradas en la gran losa de transición de planta baja (nivel considerado para la transferencia total del esfuerzo de corte).

El período obtenido mediante métodos simplificados (1), teniendo en cuenta que el mecanismo resistente consiste en tabiques en una dirección y tabiques acoplados en la otra, es:

$$T_{estimado} = \frac{N_p}{18} = 0,9 \text{ segundos} \quad (1)$$

Para calcular la masa vibrante de cada nivel (2) se estima una participación de la sobrecarga en función del uso, resultando:

$$W_i = D + \eta \times L \quad (2)$$

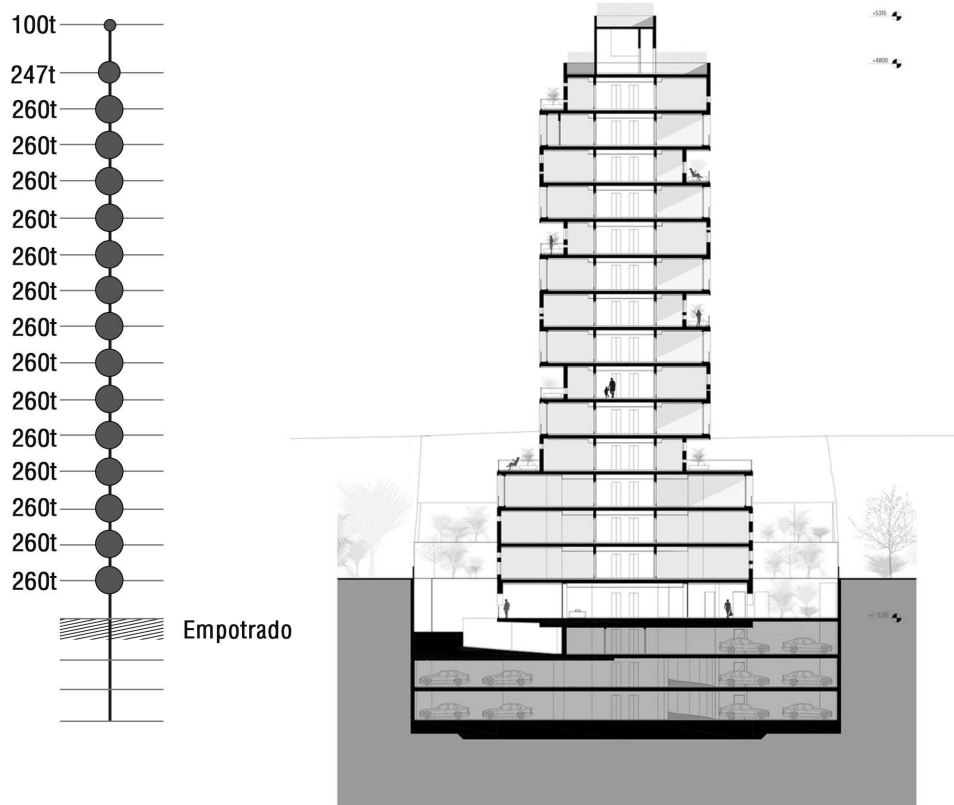


Fig. 7: Distribución de masas en altura. Corte. Fuente: <http://www.orangearchitects.nl/> y elaboración propia

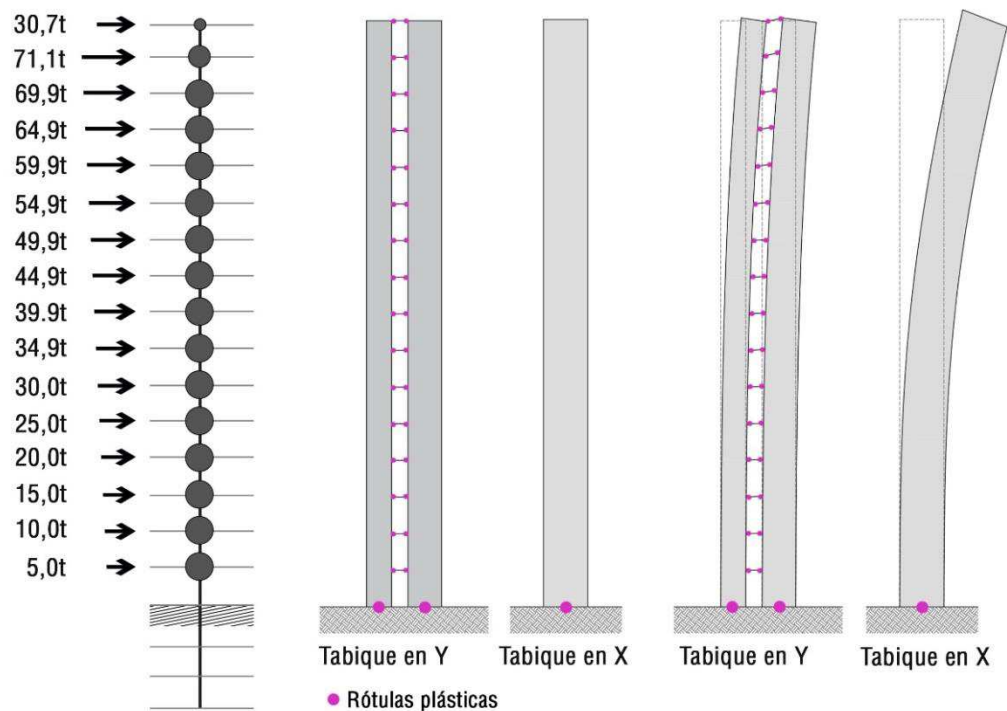


Figura 8: Mecanismo de colapso para ambas direcciones de análisis. Fuente: elaboración propia

A efectos de aplicar la reglamentación CIRSOC⁵ se indagaron sobre las características geográficas de Beirut y otras cuestiones propias del terreno de implantación, definiendo los siguientes datos para enmarcarlo en parámetros de diseño locales:

- Zona sísmica 3 (peligrosidad sísmica elevada)
- Tipo espectral II (considera la influencia del suelo)

Del espectro de diseño puede leerse una pseudo-aceleración $S_a = 0,627$ veces la aceleración de la gravedad.

Además, teniendo en cuenta que:

- Factor de riesgo para edificio de viviendas (Categoría B): $\gamma_d = 1$
- Factor de reducción en función de los tipos estructurales (tabiques en una dirección y tabiques vinculados en la otra): $\mu = 4$

El coeficiente sísmico (3) de diseño resulta:

$$C = \frac{S_a \times \gamma_d}{R} = 0,157 \quad (3)$$

Y el corte en la base (4) (5):

$$V_0 = W \times C = 626t \quad (4)$$

$$W = \sum W_i = 3987t \quad (5)$$

⁵ Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles del sistema INTI (instituto nacional de tecnología industrial).

La distribución de fuerzas en altura (Figura 8) asociada a la masa de cada nivel se determina con la siguiente fórmula (6):

$$F_k = \frac{W_k \times h_k}{\sum W_i \times h_i} \times V_0 \quad (6)$$

Se modelaron los planos resistentes y se obtuvieron los desplazamientos elásticos para todos los niveles en las dos direcciones (Figura 9):

A partir de los desplazamientos elásticos por piso obtenidos con el software se calcularon los desplazamientos últimos y se controlaron las distorsiones para compararlas con los valores límites indicados en el reglamento (Tabla 1).

DIRECCIÓN X			DIRECCIÓN Y		
Nivel	Desplazamiento último del nivel [m]	Distorsión del nivel	Nivel	Desplazamiento último del nivel [m]	Distorsión del nivel
18	2.441728	0.056938	18	2.221804	0.049850
17	2.260628	0.056671	17	2.062284	0.050055
16	2.079280	0.056656	16	1.902108	0.050208
15	1.897980	0.056471	15	1.741444	0.050208
14	1.717272	0.056040	14	1.580780	0.049979
13	1.537944	0.055294	13	1.420848	0.049469
12	1.361004	0.054178	12	1.262548	0.048623
11	1.187636	0.052633	11	1.106956	0.047398
10	1.019212	0.050615	10	0.955284	0.045753
9	0.857244	0.048080	9	0.808876	0.043655
8	0.703388	0.044989	8	0.669180	0.041069
7	0.559424	0.041306	7	0.537760	0.037971
6	0.427244	0.037003	6	0.416252	0.034335
5	0.308836	0.032049	5	0.306380	0.030143
4	0.206280	0.026413	4	0.209924	0.025366
3	0.121760	0.020061	3	0.128752	0.019963
2	0.057564	0.012950	2	0.064872	0.013808
1	0.016124	0.005039	1	0.020688	0.006465

	VERIFICA
	NO VERIFICA

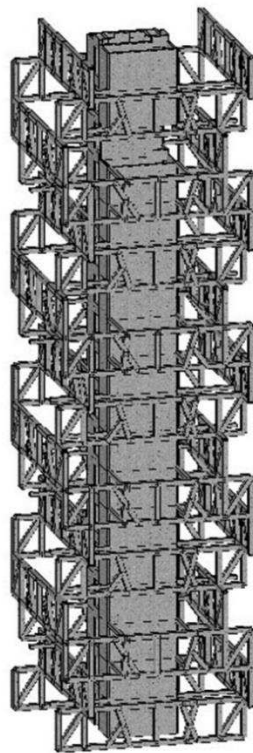
Tabla 1: Control de las distorsiones de piso. Fuente: elaboración propia.

Es decir que con la sola aplicación de este método la factibilidad constructiva de este edificio sería nula. Al tratarse de un edificio construido se puede concluir que los resultados obtenidos no son verídicos.

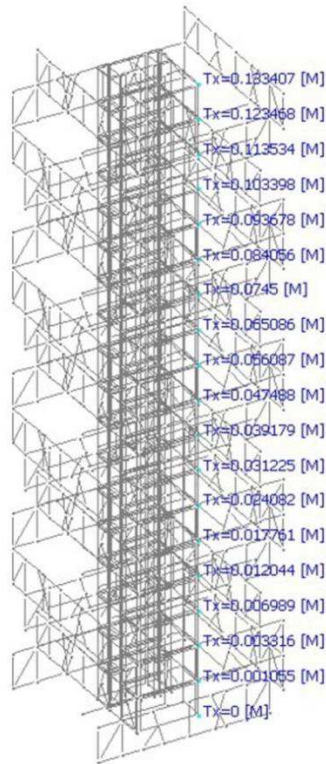
Obras de vanguardia como estas constituyen muchas veces los antecedentes de los ejercicios proyectuales desarrollados durante el grado los cuales no son posibles de evaluar en su totalidad con los métodos disponibles induciendo en la mayoría de los casos a decisiones desacertadas de proyecto.

• Análisis dinámico (modal espectral)

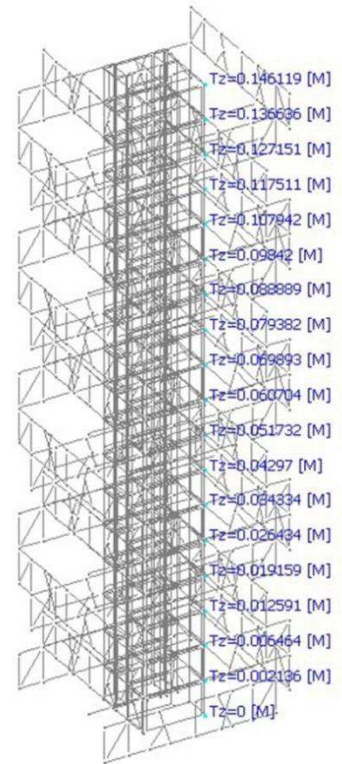
Las incertidumbres detectadas con los métodos simplificados motivaron a un estudio más exhaustivo y preciso del mecanismo resistente a fuerzas horizontales.



Modelo 3D Completo



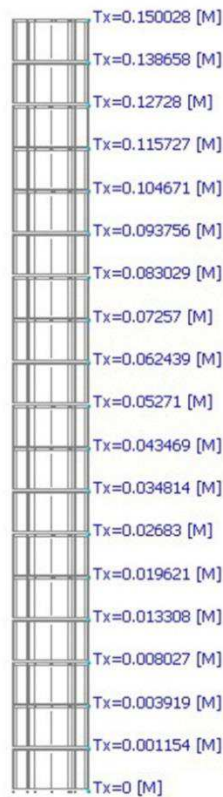
Desplazamientos en X



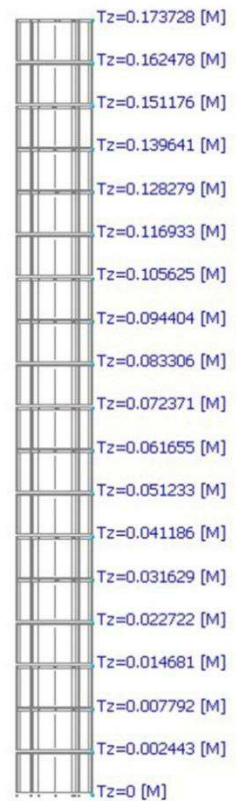
Desplazamientos en Y



Modelo sin estructura perimetral



Desplazamientos en X



Desplazamientos en Y

Figura 9: Modelado con y sin estructura perimetral. Fuente: elaboración propia.

En este caso se analizó el edificio en tres dimensiones mediante la realización de dos modelos diferentes: uno con solo el núcleo central y otro incorporando la estructura perimetral (Figura 9), evaluando el aporte de rigidez de la exo-estructura al sistema, comparando deformaciones y periodos de vibración.

Conociendo las propiedades dinámicas del edificio se calcularon las aceleraciones para cada modo de vibrar teniendo como dato el espectro de diseño del reglamento. Para obtener valores comparables entre ambos métodos se modifica el módulo de elasticidad del material de los tabiques para considerar la inercia de la sección fisurada o inercia efectiva como se indica en el reglamento, ya que los métodos simplificados contemplan al hormigón en estado último. La influencia en el sistema de los planos formados por las vigas viereendeel es apreciada modificando la inercia flexional y no axial de los elementos verticales componentes.

Evaluando la masa involucrada es posible identificar los modos de vibración significativos resultando el modo 1 para la dirección Y y el 2 para la dirección X, ambos traslacionales compatibles con los modos de vibrar que asume el método estático equivalente (Figura 10).

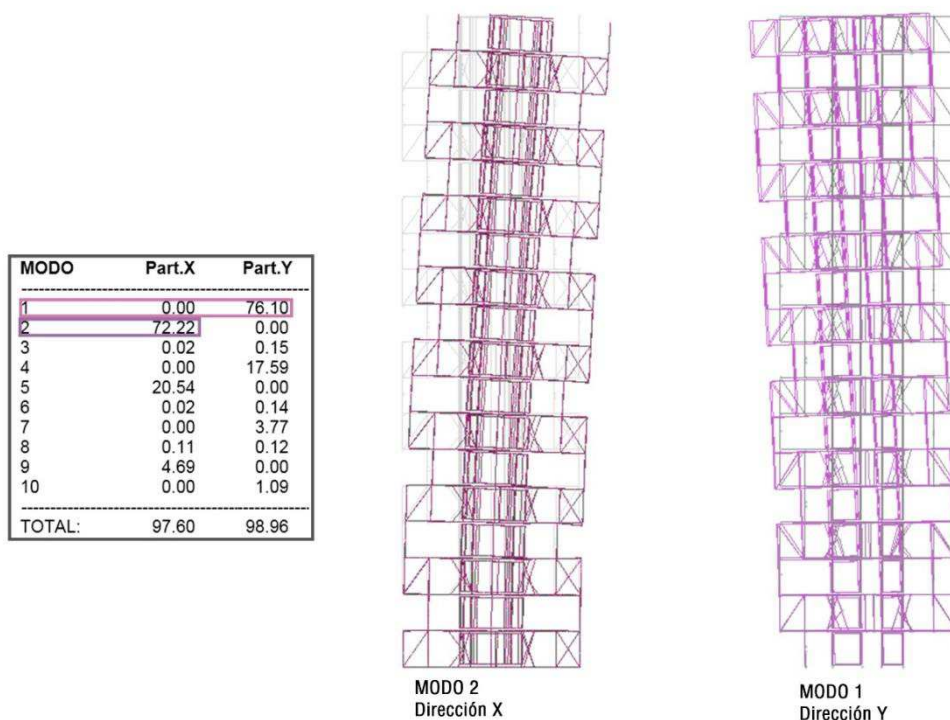


Figura 10: Modos de vibrar significativos para cada dirección de análisis. Fuente: elaboración propia.

En el modelo completo con las anteriores consideraciones se obtiene un período para el modo 1 igual a 2,70 segundos (aproximadamente 0,15 segundos por piso) y un corte basal en la dirección “X” igual a 248 toneladas y en la dirección “Y” igual a 211 toneladas o sea el 30% del obtenido con el método simplificado.

Además, la sumatoria de las reacciones horizontales en los tabiques del núcleo resultan igual al 90% del corte basal para las dos direcciones de análisis lo que demuestra la ineficiencia de la estructura perimetral en el mecanismo resistente.

Se observan en general menores deformaciones elásticas que las obtenidas con el método simplificado verificando las deflexiones (Tabla 2) en todos los niveles:

DIRECCION X		
Nivel	Desplazamiento último del nivel [m]	Distorsión del nivel
18	0.533628	0.012424
17	0.493872	0.012418
16	0.454136	0.012670
15	0.413592	0.012150
14	0.374712	0.012028
13	0.336224	0.011945
12	0.298000	0.011768
11	0.260344	0.011249
10	0.224348	0.010749
9	0.189952	0.010386
8	0.156716	0.009943
7	0.124900	0.008929
6	0.096328	0.007901
5	0.071044	0.007146
4	0.048176	0.006319
3	0.027956	0.004591
2	0.013264	0.002826
1	0.004220	0.001319

DIRECCION Y		
Nivel	Desplazamiento o último del nivel [m]	Distorsión del nivel
18	0.584476	0.011854
17	0.546544	0.011856
16	0.508604	0.012050
15	0.470044	0.011961
14	0.431768	0.011903
13	0.393680	0.011914
12	0.355556	0.011884
11	0.317528	0.011861
10	0.279572	0.011486
9	0.242816	0.011215
8	0.206928	0.010953
7	0.171880	0.010795
6	0.137336	0.009875
5	0.105736	0.009094
4	0.076636	0.008210
3	0.050364	0.007659
2	0.025856	0.005410
1	0.008544	0.002670

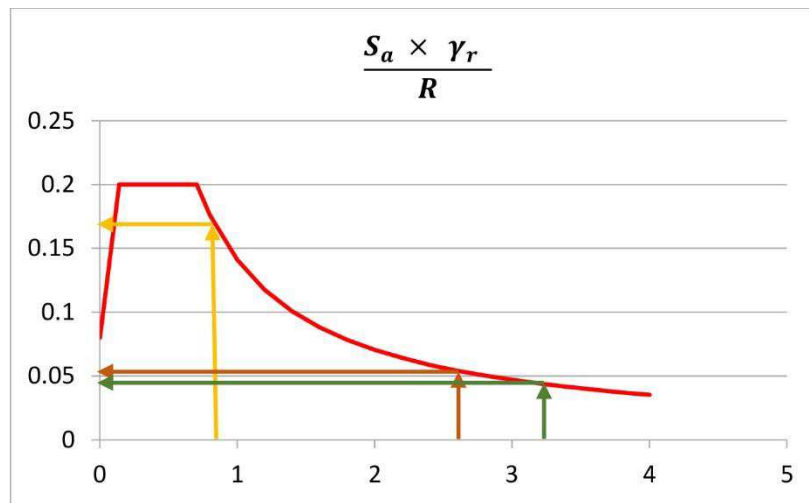
	VERIFICA
	NO VERIFICA

Tabla 2. Control de distorsiones horizontales de piso para las direcciones X e Y. Fuente: elaboración propia.

Es decir que métodos más precisos determinan la factibilidad constructiva del edificio lo cual es imposible de justificar con los métodos simplificados.

En el modelo donde se considera solo el núcleo pero se conservan las masas totales, se obtiene un período igual a 3,17 segundos dando muestras del aporte en la rigidez del sistema de la estructura perimetral (Figura 11). Así mismo se observan mayores deformaciones que las obtenidas con el modelo completo.

Esto deja en claro que una configuración irregular conforma mecanismos alternativos para la transmisión de las acciones sísmicas que resultan imprevisibles. Estos mecanismos son menos eficientes que los proporcionados por tipologías convencionales pero no despreciables como puede evaluarse en el estudio precedente.



Referencias:

- Período estimado para método simplificado
- Período análisis dinámico estructura completa
- Período análisis dinámico solo núcleo

Figura 11. Esquema comparativo de los períodos de vibración obtenidos con los 3 modelos de estudio. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Del análisis realizado se concluye que los mecanismos resistentes a fuerzas verticales y su determinación seccional, a pesar de la complejidad del edificio, son posibles de evaluar con aplicación de métodos simplificados.

Para el mecanismo resistente a fuerzas horizontales puede concluirse que si bien la estructura perimetral no es convencional y presenta una marcada irregularidad en altura su comportamiento frente a las acciones sísmicas resulta aceptable aportando mayor rigidez al conjunto. Esto no fue posible de evaluar con los métodos simplificados.

Observando comparativamente los períodos de vibración obtenidos con las 3 metodologías aplicadas para la evaluación de los mecanismos resistentes a fuerza horizontales se evidencia la ineficiencia del método estático equivalente en estos casos ya que el comportamiento que describe no es representativo del comportamiento real del edificio frente a las acciones sísmicas.

Es por eso que la elección de las herramientas de evaluación del comportamiento estructural debe realizarse siempre de acuerdo al tipo de diseño planteado y según el caso de estudio. Una mala elección y/o interpretación de los resultados puede significar adoptar decisiones desafortunadas de proyecto.

Si bien el estudiante de arquitectura recibe instrumentación en el grado en cuanto al análisis de edificios frente a solicitaciones sísmicas la complejidad del proyecto arquitectónico de un edificio en altura en algunos casos los vuelve insuficientes debiendo corresponderse con un trabajo interdisciplinario que involucre especialistas en el tema con formación específica.

Referencias bibliográficas

- Applied Technology Council (1996) *Sismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. California.
- Arnold C., Reitherman R. (1987) *Configuración y diseño sísmico de edificios*, México, Limusa.
- Material didáctico de la cátedra de Estructuras III FAUD-UNC (2014) *El edificio en altura*, Córdoba, Publicación digital <http://uncavim10.unc.edu.ar/course/view.php?id=43§ion=14>
- Moisset, D. (1999) *Intuición y Razonamiento en el Diseño Estructural*, Córdoba, Argentina, Ed. Ingreso.
- Moisset, D., Goytia, N. (2002) *Diseñar con la Estructura*. Córdoba, Argentina, Ed. Ingreso.
- NILSON, A. (2001) *Diseño de estructuras de concreto*. Ed. Mc Graw Hill
- Paulay T.; Priestley N. (1992) *Sismic design of reinforced concrete and masonry buildings*
- Reboredo, A. (2000) *Manual de construcción sísmo resistente*. UNC
- Reglamento INPRES-CIRSOC 103 – Parte I (Julio 2013) *Reglamento Argentino para construcciones sísmorresistentes*.
- Reglamento CIRSOC 201 (2005) *Reglamento Argentino de estructuras de hormigón*.
- Torroja Miret, E. (2000) *Razón y ser de los tipos estructurales*. 10° Ed. Madrid, España, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja.