

## EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO SÍSMICO DE UN EDIFICIO SIN DISEÑO SISMO RESISTENTE

### SEISMIC PERFORMANCE EVALUATION OF A BUILDING WITHOUT EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN

Francisco A. Calderon<sup>a</sup>, Juan P. Bianco<sup>a</sup>, Oscar Möller<sup>b</sup>, Juan P. Ascheri<sup>b</sup>, Gustavo Palazzo<sup>a</sup> y Marcelo Guzmán<sup>a</sup>

<sup>a</sup>CeReDeTeC, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, Rodríguez 273, Ciudad de Mendoza, Argentina, [francisco.calderon@frm.utn.edu.ar](mailto:francisco.calderon@frm.utn.edu.ar), [http:// www.frm.utn.edu.ar](http://www.frm.utn.edu.ar)

<sup>b</sup>Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad de Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, [moller@fceia.unr.edu.ar](mailto:moller@fceia.unr.edu.ar), [http:// www.imaefceia.unr.edu.ar](http://www.imaefceia.unr.edu.ar)

**Palabras clave:** Desempeño sísmico, Zona 0, edificios sin diseño sísmico.

**Resumen.** El objetivo de este trabajo es conocer el desempeño sísmico de un edificio diseñado sin previsiones sísmicas. Se eligió un edificio de H°A° de siete niveles y un cuerpo emergente de dos niveles ubicado en la Zona 0 (zona sísmica). Se utilizó el método del “espectro de capacidad”, donde se realiza un análisis estático no lineal incremental (Pushover) y se obtiene una curva corte vs. desplazamiento de piso; la cual es comparada con la demanda (espectro de diseño). En vista de que en Argentina la Zona 0 no posee espectro de diseño, se utilizó la forma del espectro de la Zona 1 y distintos PGA (peak ground acceleration) para estimarlos. Obteniendo un punto de desempeño para cada espectro. El análisis estructural se realizó con el programa SeismoStruct. Para el hormigón fue considerado el modelo no lineal de confinamiento constante propuesto por Madas y Mander. Para la armadura se usó un modelo de acero bilineal. Los elementos se modelaron con elementos tipo frame con inelasticidad distribuida. En los resultados se presentan las aceleraciones y desplazamientos capaces de ser resistidos por este edificio sin previsiones sísmicas.

**Keywords:** Seismic performance, Zone 0, building without seismic design.

**Abstract.** The objective of this study is to assess the seismic performance of a building designed without seismic provisions. A seven-story reinforced concrete building with an additional two-story section, located in Seismic Zone 0, was selected. The "capacity spectrum" method was used, where a nonlinear static incremental analysis (Pushover) was performed, yielding a shear force vs. floor displacement curve, which was compared to the demand (design spectrum). Since Zone 0 in Argentina does not have a design spectrum, the shape of the Zone 1 spectrum and different PGAs were used to estimate them, obtaining a performance point for each spectrum. The structural analysis was conducted using SeismoStruct. For the concrete, the constant confinement nonlinear model proposed by Madas and Mander was used. A bilinear steel model was used for the reinforcement. The elements were modeled as frame elements with distributed inelasticity. The results present the accelerations and displacements that this building, designed without seismic provisions, can resist.

## 1 INTRODUCCIÓN

En Argentina, el CIRSOC junto con el INPRES son los entes encargados de la redacción de los reglamentos de aplicación frente a las acciones sísmicas para las obras civiles. Dentro de este ámbito, una de las variables que intervienen en la determinación de dichas acciones, es la aceleración del suelo. Desde la década de 1960, se han desarrollado mapas donde la Argentina se dividió en 5 zonas con diferentes aceleraciones del suelo (Figura 1). La zona 4 de muy elevado riesgo sísmico se encuentra ubicada entre el sur de la provincia de San Juan y el norte de la Provincia de Mendoza. El riesgo va disminuyendo desde la zona centro oeste del país hasta llegar a la zona 0 en el este del mismo. Por otro lado, la zona 0 concentra alrededor de 28 millones de personas, más del 60 % de la población argentina y aproximadamente 2 millones de personas en Uruguay viven al otro lado del Río de la Plata. En esta zona se encuentran ciudades como Rosario y Buenos Aires. La zona 0 ha sido históricamente caracterizada como de “Muy Reducida” peligrosidad sísmica. En vista de esto INPRES-CIRSOC 103 parte 1 (IC103-1) no da espectro de diseño para esta zona, aunque realmente sí existe un riesgo sísmico. Actualmente el Reglamento solamente da los siguientes lineamientos:

*a) Para las construcciones del grupo Ao será de aplicación todo lo establecido en el presente Reglamento.*

*b) Las construcciones de hasta 3 pisos o 12m de altura están eximidas de la aplicación del presente Reglamento.*

*c) Las construcciones de altura total superior a los 12m, diseñadas para los efectos del viento están eximidas de la aplicación del presente Reglamento si se cumplen simultáneamente las siguientes condiciones:*

*c1) Han sido verificadas bajo los efectos del viento en las dos direcciones principales*

*c2) La resultante en cada dirección de las fuerzas del viento es igual o mayor que el 1,5% del peso total de la construcción*

*c3) El punto de aplicación de la fuerza resultante de la acción del viento se encuentra aproximadamente coincidente o por encima del centro de gravedad de la construcción.*

*Cuando no se cumplan los requisitos de c1, c2 y c3 se deberá verificar la estructura bajo la acción de fuerzas horizontales aplicadas en los centros de gravedad de intensidad igual al 1,5% de los pesos respectivos y cumplir los requisitos sobre arriostramiento de fundaciones establecidos en el Capítulo 9 (INPRES-CIRSOC 2018).*

En vista de esto, surge el cuestionamiento de cuál será el desempeño de los edificios de la zona 0 frente a un posible evento sísmico. En este trabajo se presenta la evaluación de un edificio diseñado para la zona 0 con los lineamientos dados por el IC103-1 y para el cual en su filosofía de diseño dicha acción no fue contemplada. El objetivo del mismo es conocer cuál es el nivel de desempeño del edificio. Para esto se llevó a cabo un análisis de Pushover. La demanda sísmica fue definida a partir del análisis de varios espectros recopilados en la bibliografía, como así también el valor de la aceleración del suelo.

## 2 DEMANDA SISMICA

Para el realizar un análisis de Pushover es necesario contar con un espectro de diseño con el cual poder comparar la curva de capacidad. Para definir la demanda existen al menos dos métodos, determinístico y probabilístico. Si bien para definir un espectro es necesario contar con información del sitio como por ejemplo registros de sismicidad histórica, básicamente se pueden generar con 2 factores: i) aceleración al periodo 0.2 segundos y ii) aceleración al periodo 1 segundo. Pero la obtención de estas aceleraciones no siempre es posible, de hecho, para la generación de los espectros del reglamento argentino estos valores no se tenían. El

único valor disponible era la aceleración máxima del suelo para suelo tipo B (definido mediante la  $V_{s30}$  entre 760 a 150 m/s). Este valor es coincidente con el valor de aceleración a periodo 1 segundo para este tipo de suelo (Tipo B) y el valor de aceleración para periodo 0.2 segundo se obtuvo a amplificar la aceleración del suelo 2.5 veces según Seed et al. 1976. A partir de esto los espectros para los demás tipos de suelo y zonas sísmicas se obtuvieron por interpolación con los espectros del UBC 1997 (Giuliano, 2011).

En vista de esto y a falta de datos históricos y geológicos, una forma de definir un espectro es mediante la aceleración máxima del suelo (tipo B) y la forma del espectro. Por lo que para este trabajo nos concentramos en evaluar estos dos factores (Giuliano, 2011).

Aunque esta zona sea considerada de muy baja sismicidad hay registro de actividad sísmica. Entre los eventos principales en el Río de la Plata, se encuentran dos sismos producidos en el año 1888 de magnitud 6. Por otro lado, existen más de 30 eventos sísmicos registrados en la historia desde la época colonial (Tabla 1). De hecho, se menciona la manifestación de tres pequeños “Tsunamis” en la costa del Río de la Plata. La Tabla 1 muestra una recopilación de estos eventos obtenida de diferentes fuentes (Benavídez-Sosa 1998; Sánchez-Bettucci et al. 2018; Rossello et al. 2020, Baxter et al. 2021).

Orden	Fecha	Lugar	M	Prof. [km]	Comentario
1	30 de octubre de 1542	Colonia - Buenos Aires ?	>6?		¿Tsunami? - 14 muertos
2	19 de octubre de 1845	Buenos Aires	5.4		
3	9 de agosto de 1848	Punta del Este	5.3		Hubieron réplicas por un mes
4	5 de junio de 1888	Río de la Plata	5.8	30	¿Tsunami? - Daño en construcciones de mampostería
5	26 de junio de 1888	Río de la Plata	5.5		
6	27 de octubre de 1894	Uruguay			
7	13 de junio de 1907	Uruguay			
8	17 de diciembre de 1920	Uruguay			
9	10 de noviembre de 1932	Santa Fe	6		
10	2 de enero de 1935	Santa Fe	3		
11	21 de enero de 1948	Entre Ríos - Corrientes	5.8		
12	17 de mayo de 1949	Santa Fe	4.5		
13	22 de septiembre de 1949	Buenos Aires	3.7		
14	12 de febrero de 1967	Buenos Aires	5.3		
15	2 de noviembre de 1971	Buenos Aires	3.5		
16	26 de junio de 1988	Atlántico	5.1		
17	10 de enero de 1990	Uruguay	3		
18	5 de junio de 1993	Corrientes	3.4		
19	11 de julio de 2011	Atlántico	4.1		
20	4 de octubre de 2014	Uruguay			
21	12 de enero de 2015	Uruguay			¿Tsunami?
22	23 de marzo de 2016	Uruguay	4		
23	9 de agosto de 2016	Buenos Aires	3.7	30	
24	7 de noviembre de 2016	Buenos Aires	4	10	
25	24 de noviembre de 2016	Uruguay	3.4	14	Daño en viviendas de mampostería
26	22 de diciembre de 2016	Entre Ríos - Corrientes	3.2		
27	29 de enero de 2018	Santa Fe	4.1		
28	22 de noviembre de 2018	Entre Ríos	3.8	32	
29	30 de noviembre de 2018	Buenos Aires	3.8	19	Falla inversa con componente transcurrente
30	27 de diciembre 2018	Buenos Aires	3.7	32	
31	18 de julio de 2019	Buenos Aires	3.2	52	
32	8 de mayo de 2021	Uruguay	4.3		
33	25 de febrero de 2022	Buenos Aires	3.6	36	
34	25 de febrero de 2022	Buenos Aires	3.1	31	
35	12 de julio de 2023	Río de La Plata	4.2	10	Falla inversa
36	24 de enero de 2024	Buenos Aires	3.1	29	

Tabla 1. Sismos sentidos en la zona 0, en cercanías del Río de la Plata.

Baxter et al. llevaron a cabo un estudio sobre la sismicidad en la zona del Río de la Plata. Luego de una revisión histórica y un análisis estadístico llegaron a la conclusión de que un sismo de magnitud 6.6 es posible y recomendaron para el sismo de diseño (10% de probabilidad de excedencia en 50 años o tiempo de retorno 500 años, modelo de Poisson) un

PGA= 0.1 g en una zona de 70 km alrededor del Rio de la Plata, esto equivale a asignar zona 1 a esta región, tanto en Argentina como en Uruguay (Baxter et al. 2021).

Por otro lado, desde la década del 60 se comenzaron a elaborar mapas de aceleración del suelo para toda la Argentina. La Figura 1 presenta la evolución de dicho parámetro a lo largo del tiempo en forma de mapas (COCAR 70, NAA 80, INPRES-CIRSOC 103; INPRES 2021).

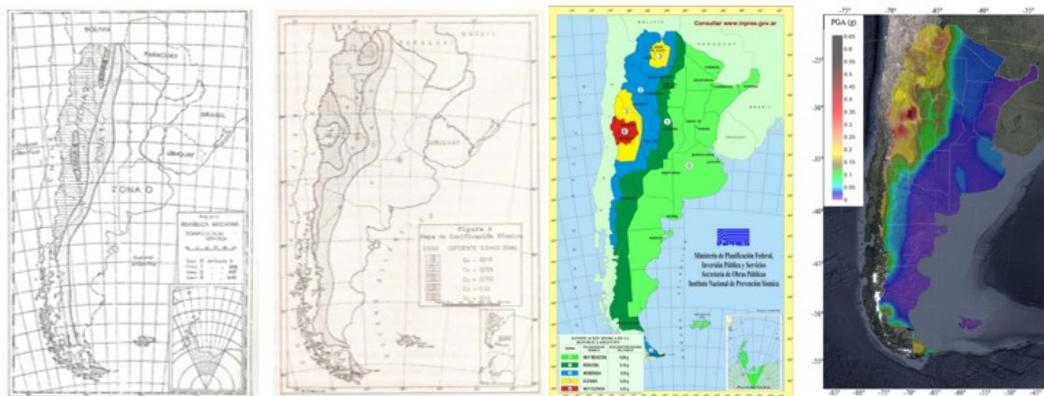


Figura 1: Evolución de los mapas de aceleración del suelo de la República Argentina.

La Tabla 2 muestra los valores de aceleración del suelo para el área de estudio en este trabajo, la zona 0. Como puede observarse y dado el avance del conocimiento, las aceleraciones han ido incrementándose con el paso de los años desde 0% hasta 5% g en el último estudio presentado por el INPRES en el año 2022 para algunos sitios de la zona 0. Respecto a la aceleración del suelo (as) dado en estos mapas en principio es la aceleración en un sitio tipo B, básicamente un suelo rocoso (Vs30 entre 760 m/s a 1500 m/s), pero el último mapa presenta una estimación estadística del PGA lo que sería equivalente al factor Ca del reglamento (aceleración de anclaje).

Según estudios realizados por la Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina, en el informe presentado en 2012 (ARN 2012), existen tres estudios de peligrosidad sísmica. El primero, de 1980 para la construcción de Atucha II realizado por Gil, Nafa y Zamarbide utilizando un enfoque determinista concluyeron que el PGA era de 0.1 g para la falla de Paraná a 20 km del sitio y magnitud de 5.5. El segundo y tercer estudios, correspondiente a la actualización de la peligrosidad sísmica, realizados respectivamente por James J. Johnson & Associates y por Atomic Energy of Canada Limited, hicieron una evaluación probabilística del peligro sísmico. Estos estudios presentan valores de PGA y espectros para tiempos de retorno de 100 años a 10.000.000 años. Para el caso del sismo de diseño, con un periodo de recurrencia de 500 años el valor de PGA resulta igual a 2.6 % g.

Zona 0		
Año	Aceleración máxima del suelo	Documento
1970	0.000	CONCAR 70
1977	0.013	NAA 80
1991	0.040	INPRES-CIRSOC 103
2012	0.026	ARN
2021	0.100	Baxter et al
2023	0.050	INPRES

Tabla 2. Evolución de la aceleración máxima del suelo para la zona 0.

Bertero y Bertero (2022) presentaron un estudio de carácter probabilístico para la ciudad

de Buenos Aires incluyendo el efecto de sitio. El espectro resultante para 500 años de recurrencia carece de datos entre los periodos de 0 s a 0.5 s y está desarrollado a partir de datos de sismos lejanos principalmente, pero presenta resultado en la zona de periodos sensibles a la velocidad, poniendo de manifiesto el efecto de sitio debido a las bajas velocidades de onda de corte del suelo. Si bien no se tienen datos del periodo del suelo en el sitio de emplazamiento del acelerómetro utilizado en estos trabajos, se ha estimado que la velocidad  $V_s$  (ponderada) se encuentra entre 386 m/s y 429 m/s y una profundidad hasta el basamento de entre 273 m y 320 m. Con estos parámetros se determinó que el periodo fundamental del suelo se encuentra entre 2.5 s y 3.3 s.

Para este estudio se utilizaron tres espectros a partir de los valores de PGA dados por Baxter et al., ARN (probabilístico) e INPRES 2022. La Figura 2 presenta la forma y las variables del espectro de IC103 parte 1. Para la generación de los espectros en la zona 0 se ha tomado el criterio expuesto previamente. A partir del valor de  $C_a$  (igual a PGA en este caso), se escalaron los espectros correspondientes a la zona 1. Por otro lado, el valor de  $T_3$  (periodo donde cambia el espectro de  $1/T$  a  $1/T^2$ , ver Figura 2) fue tomado del estudio realizado por Bertero y Bertero igual a 2.5 segundos, el cual podría extenderse hasta 3.3 segundos, valor surgido de analizar los periodos del suelo en la Ciudad de Buenos Aires. Para cada valor de  $C_a$  adoptado se generaron los espectros para los tres tipos de sitio. La Figura 3 presenta los espectros determinados para la Zona 0.

La aceleración del suelo presentada por Gil, Nafa y Zamarbide (Atucha) evaluada de manera determinística es de 0.1 g coincide con la aceleración del suelo propuesta por Baxter et al. la cual surge de un análisis probabilístico. Siendo este el límite superior estudiado. El límite inferior viene dado por los espectros probabilísticos de Atucha para 500 años de recurrencia. Por otro lado, es imprescindible mayor cantidad de estudios para la Zona 0.

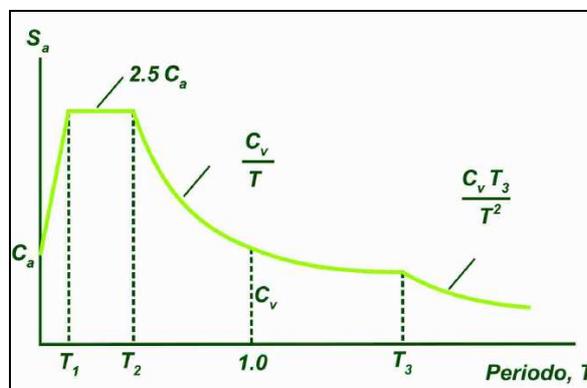


Figura 2: Forma y parámetros para la definición de los espectros según el IC103 parte 1.



Figura 3: Espectros determinados para las tres aceleraciones del suelo consideradas: i) Bexter et al (igual al espectro de la zona 1); ii) Mapa INPRES 2022 y iii) ARN probabilístico.

### 3 MODELO DEL EDIFICIO

Las características generales del programa computacional empleado en las simulaciones numéricas, y las consideraciones que se tuvieron en cuenta para construir el modelo se exponen en esta sección. El edificio posee una estructura de pórticos y núcleo de tabique de hormigón armado en la dirección transversal, y de pórticos rellenos con mampostería en la dirección longitudinal. El mismo posee siete niveles y un cuerpo emergente de dos niveles más, con una altura hasta el nivel 7 de 19.42 m y de 25.82 m en total. El edificio posee una planta regular, presentando el nivel planta baja una superficie y altura mayor que la del resto de los niveles. El edificio en estudio se encuentra emplazado en la Zona 0, en la ciudad de Rosario y es una tipología común.

#### 3.1 Programa computacional empleado

Para las simulaciones numéricas del edificio se empleó el programa computacional SeismoStruct (SeismoStruct, 2010), que es de acceso libre para fines académicos. Fue elegido este software ya que permite considerar modelos constitutivos para elementos de hormigón armado y excitados bajo acciones dinámicas. Este programa de elementos finitos ha sido desarrollado para realizar simulaciones numéricas de diferentes clases de estructuras sometidas a acciones estáticas o dinámicas (tal como las acciones sísmicas). Es capaz de predecir el comportamiento de estructuras sometidas a grandes desplazamientos, considerando no linealidades geométricas y del material. Para representar el comportamiento de una sección transversal se emplea en este programa la aproximación por fibra. El estado tensión – deformación de un elemento viga – columna se obtiene a través de la integración de las respuestas tensión – deformación uniaxial, no lineal, de cada fibra individual en que la sección es dividida. En los modelos considerados en este trabajo, las secciones transversales de vigas y columnas fueron subdivididas en 200 fibras. Esa cantidad es la recomendada por el programa para elementos sometidos a altos niveles de comportamiento inelástico.

#### 3.2 Geometría estructural

A partir de planos estructurales y arquitectónicos se procedió a definir la geometría del edificio asumiendo algunas simplificaciones. En el caso de la mampostería de poco espesor (12 cm) y que no posee encadenados de hormigón en su perímetro no fue modelada, aunque puede presentar de presentar rigidez e incidir en las distorsiones de piso. Por otro lado, la mampostería encadenada se modelo con el espesor correspondiente al de las columnas de borde. Respecto a las fundaciones, la simplificación tuvo que ver con representar a las mismas como vínculos perfectamente empotrados. La Figura 4 muestra una imagen del modelo del edificio.

#### 3.3 Materiales

Para el hormigón se utilizó el modelo no lineal de Mander. Se trata de un modelo uniaxial no lineal de confinamiento constante, programado inicialmente por Madas (1993), que sigue la relación constitutiva propuesta por Mander et al. (1988) y las leyes cíclicas propuestas por Martínez-Rueda and Elnashai (1997). Los efectos del confinamiento provisto por la armadura transversal son incorporados mediante las leyes propuestas por Mander et al. (1988), en las cuales se asume una presión de confinamiento constante a lo largo de todo el rango de esfuerzos-deformaciones.

Para el acero se utilizó un modelo bi-lineal. Se trata de un modelo uniaxial de esfuerzo-deformación bi-lineal con endurecimiento cinemático, en el cual el rango elástico permanece

constante a lo largo de las fases de carga, y la regla de endurecimiento cinemático para la superficie de fluencia se asume como una función lineal del incremento de deformación plástica. Este modelo simple se caracteriza por tener parámetros de calibración fácilmente identificables y por su eficiencia computacional.

Para la mampostería se utilizó el elemento inelástico infill. Se trata de un elemento de mampostería definido por cuatro nodos, desarrollado y programado inicialmente por Crisafulli (1997) e implementado en SeismoStruct por Blandon (2005), para el modelado de la respuesta no lineal de los paneles divisorios o de cerramiento (infill panels) en estructuras tipo pórtico.

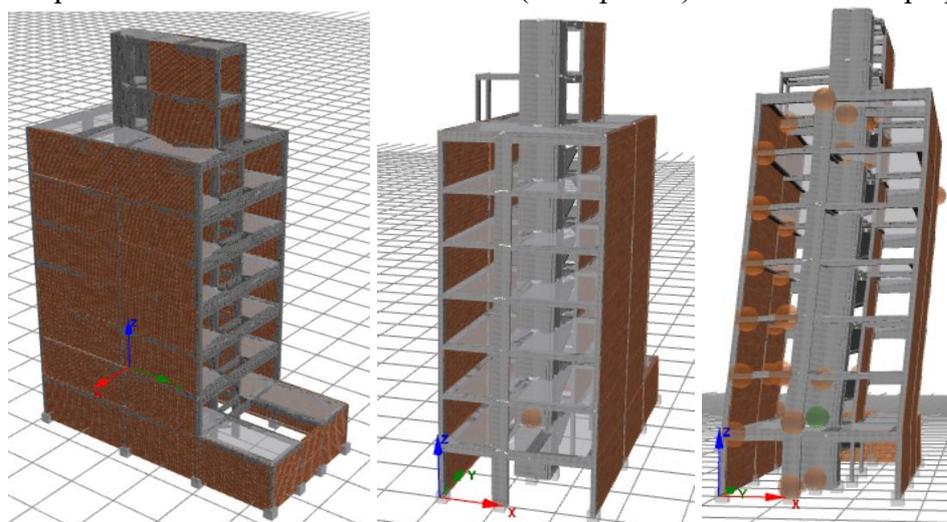


Figura 4: a) Modelo del edificio, b) formación de la primera rotula ( $V_E= 600\text{kN}$ ) y c) formación de rotulas para la carga de fluencia de la simplificación bilineal ( $V_E= 1310\text{ kN}$ ).

### 3.4 Clases de elementos

En SeismoStruct (2010) los elementos frame con inelasticidad distribuida permiten modelar miembros de pórticos espaciales con no linealidades geométrica y material. En este programa se pueden implementar estos elementos con dos formulaciones: una clásica basada en desplazamientos (denominado *infrmDB*), y otra más reciente basada en fuerzas (*infrmFB*). Se indica en el programa que, para simular materiales inelásticos con la formulación clásica, es necesario refinar la discretización de los elementos estructurales (4-5 elementos por miembro estructural). Por ello la formulación basada en fuerza es la mejor opción, ya que permite tener modelos más pequeños y con tiempos de análisis más rápidos.

### 3.5 Secciones transversales de vigas y columnas

Para las vigas y columnas se adoptaron secciones rectangulares de hormigón armado (denominadas *rcrs*). Para estas secciones se especificaron los materiales de la armadura, el hormigón de recubrimiento y el hormigón confinado por estribos, parámetros geométricos de la sección, secciones de armadura y su ubicación en la sección y la masa agregada. Para las columnas no se consideró masa agregada, pero sí en las vigas, teniendo en cuenta la losa y la sobrecarga que éstas soportaban.

## 4 MÉTODO ESPECTRO DE CAPACIDAD

El método del espectro de capacidad, tal como se describe en el ATC-40 (Applied Technology Council, 1996), es una técnica utilizada para evaluar el desempeño sísmico de estructuras, principalmente edificios, bajo cargas sísmicas. Este método de evaluación sísmica

no lineal permite estimar la capacidad de una estructura para resistir fuerzas sísmicas y se utiliza para predecir el comportamiento del edificio ante diferentes niveles de demanda sísmica. En primer lugar, se realiza un análisis estático no lineal (Pushover) de la estructura, donde se aplican incrementos de carga lateral (acción sísmica) hasta que la estructura alcanza su capacidad máxima o colapsa. Este análisis genera una curva de capacidad (Figura 4) que muestra la relación entre la fuerza cortante basal y el desplazamiento del edificio en su punto de control que normalmente se sitúa en el techo del último nivel, pero en el caso de edificios con áticos o cuerpos emergentes, como el caso en estudio, se situó en la losa del séptimo nivel. Se representa la demanda sísmica mediante un espectro de respuesta en coordenadas de aceleración vs. desplazamiento (ADRS - Acceleration Displacement Response Spectrum). La curva de capacidad obtenida del análisis Pushover se transforma al mismo formato que el espectro de demanda (coordenadas ADRS) para permitir la comparación directa. Esta transformación implica convertir la fuerza cortante basal a aceleración espectral y el desplazamiento del punto de control a desplazamiento espectral. Se encuentra el punto de intersección entre la curva de capacidad transformada y el espectro de demanda, conocido como el punto de desempeño. Este punto indica el nivel de desplazamiento y aceleración que la estructura experimentará durante un evento sísmico dado, lo cual se utiliza para evaluar si el edificio cumplirá con los requisitos de desempeño deseados.

## 5 RESULTADOS

La Figura 5 presenta la curva de capacidad obtenida para el análisis de Pushover del edificio estudiado y una simplificación bilineal de la misma. Esta simplificación se realizó a partir de la metodología propuesta en el ATC-40. La Figura 6 presenta la superposición de los espectros de demanda para los tres espectros estudiados y los tres tipos de sitio (suelo) con la curva de capacidad transformada. Como puede verse por los sitios 1 y 2 y para las tres aceleraciones del suelo estudiada la estructura se encuentra en rango lineal. Para el caso del sitio 3, solo hay incursiones no lineales para la aceleración del suelo de 0.1g propuesta por Baxter et al. La Tabla 3 presenta los valores de aceleración y desplazamiento de los distintos puntos de desempeño obtenidos para los distintos niveles de demanda estudiados, donde se ha resaltado en color rojo el único caso donde la estructura incurriría en no linealidades. Respecto a la deriva de piso máxima en este último caso resulta ser de  $0.66\% < 1.5\%$  valor límite dado por el IC103-1. Cabe aclarar que, si bien el análisis se ha realizado sobre la curva simplificada, si se utiliza la curva real, las no linealidades comienzan a manifestarse mucho antes, aproximadamente a un valor de corte  $VE = 600$  kN donde aparece la primera rótula en la estructura. En la Figura 4 pueden apreciarse ambos mecanismos.

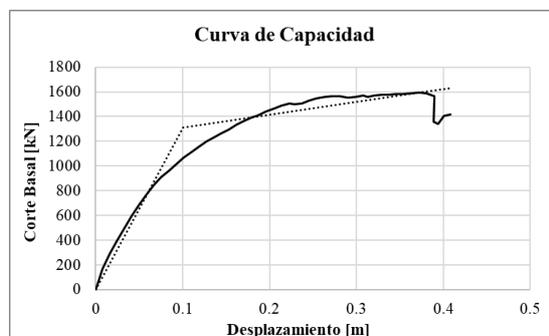


Figura 5: Curva de capacidad del edificio (línea llena) y curva simplificada bilineal (línea de puntos).

Sitio	Desplazamiento [cm]			Sitio	Aceleración [g]		
	PGA [g]				PGA [g]		
	0.1	0.05	0.026		0.1	0.05	0.026
1	5.39	2.72	1.32	1	0.077	0.047	0.026
2	8.18	4.22	1.96	2	0.098	0.058	0.034
3	13.05	6.17	2.98	3	0.128	0.084	0.05

Tabla 3. Puntos de desempeño para los casos analizados.

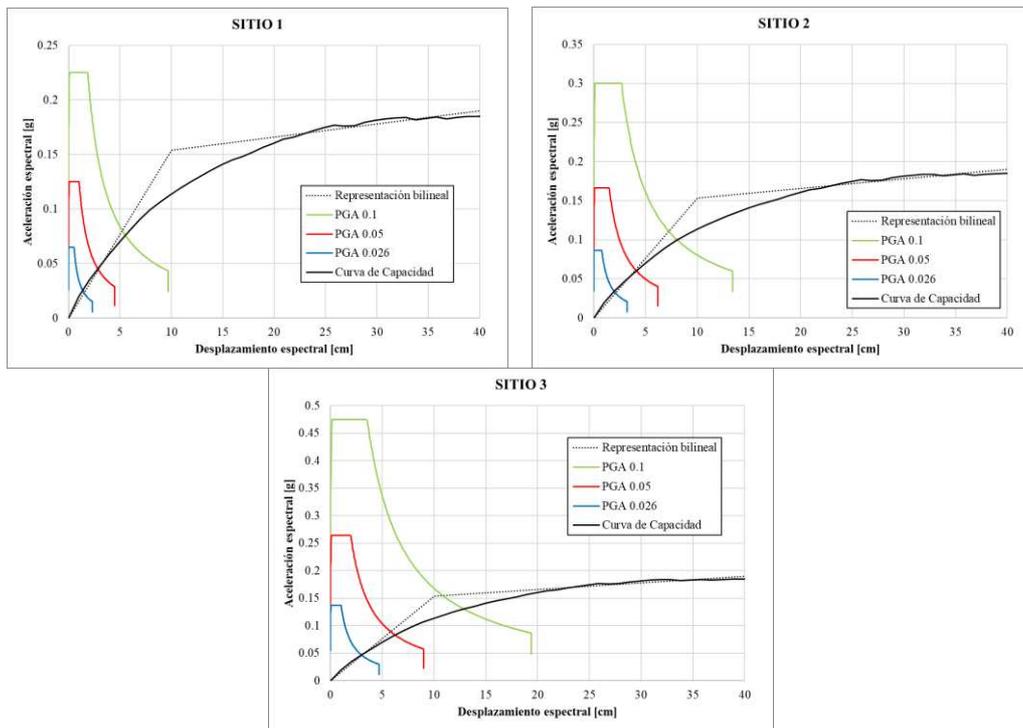


Figura 6: Comparación de las curvas de capacidad y los espectros de respuesta aceleración – desplazamiento para las tres demandas propuestas y los tres tipos de sitio (suelo).

## 6 CONCLUSIONES

El análisis de Pushover realizado demuestra ser una herramienta útil para la verificación frente a las acciones sísmicas en zona de baja sismicidad más allá de ser un análisis estático. El análisis utilizado resulta fácil de implementar en estructuras de hormigón armado y estructuras metálicas. Por otro lado, para el caso de estructura de mampostería el análisis de pushover es más complejo, en principio por la gran cantidad de parámetros que presenta el modelo utilizado en este trabajo. Si bien el reglamento no contempla el análisis de pushover, para el caso de la Zona 0 y en estructuras esenciales por ejemplo de grupo A, como escuelas, hospitales, etc... este análisis puede ser una opción rápida para la verificación sísmica una vez diseñada la estructura sin previsiones sismorresistente.

El edificio analizado resulta tener un adecuado desempeño, observándose un comportamiento en campo elástico para la demanda correspondiente a los espectros realizados a partir de ARN y de INPRES 2022 para todos los tipos de suelo. Por otro lado, el espectro realizado a partir de Baxter et al. presenta algunas incursiones inelásticas para el Sitio tipo 3 (suelos blandos) y comportamiento elástico para los otros dos Sitios. Cabe aclarar que estos resultados son consecuencia de utilizar la curva de capacidad simplificada (bilineal), ya que como se menciona en la sección de resultados, las no linealidades comienzan a un valor de corte de 60 kN, por lo que en realidad pueden existir incursiones no lineales en los otros sitios

y para las demás aceleraciones del suelo analizadas. Respecto a las indicaciones del reglamento se debería revisar y calibrar el valor dado de 1.5 % del peso del edificio, en vista de que las acciones de viento están luego mayoradas por 1.6 en las combinaciones de diseño, en cambio las combinaciones que incluyen sismo no mayoran las acciones. Adicionalmente la nueva versión de CIRSOC 102-24 indica velocidades de viento mayoradas (o de mayor tiempo de recurrencia hablando estrictamente), por lo que debe especificarse de una manera mas clara a que carga de viento se hará referencia en IC103-parte 1.

En futuras líneas de investigación, se pretende avanzar en el tipo de análisis a uno de historia en el tiempo no lineal con registros sísmicos compatibles con los espectros generados y aplicar estos métodos a otras tipologías estructurales.

## REFERENCIAS

- Seed, H.B., Ugas, C. and Lysmer, J. “Site-dependent Spectra for Earthquake-resistant Design”. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 66 (1), 221-243, 1976.
- INPRES - CIRSOC 103 – Parte I, Normas Argentinas para Construcciones Sismorresistentes, Parte I: Construcciones en general. *INPRES y CIRSOC*, 2018.
- Giuliano A. P. Determinación de los sismos de diseño para el nuevo proyecto de reglamento argentino para construcciones sismorresistentes INPRES-CIRSOC 103. *Inédito*, 2011.
- [http://contenidos.inpres.gob.ar/actualizacion\\_mapa](http://contenidos.inpres.gob.ar/actualizacion_mapa) INPRES 2022.
- [http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/Reglamentos/CONCAR-70\\_Normas.pdf](http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/Reglamentos/CONCAR-70_Normas.pdf) CONCAR 70.
- <http://contenidos.inpres.gob.ar/docs/Reglamentos/INPRES-NAA-80.pdf> NAA 80.
- Benavidez-Sosa, A. Sismicidad y sismotectónica en Uruguay. *Física de la Tierra*, 10, 167-186, 1998.
- Sánchez-Bettucci, L.; Rodríguez, M.; Castro, H.; Curbelo, A.; Latorres, E.; Lefebvre, R. Eventos sísmicos recientes en Uruguay (2016 - 2017). *Revista Investigaciones*, 1(1), 41-58. OGU. (2019). Historia de la sismicidad en Uruguay. 2018.
- Rossello, E.A.; Heit, B.; Bianchi, M. Shallow intraplate seismicity in the Buenos Aires province (Argentina) and surrounding areas: is it related to the Quilmes Trough?. *Boletín de Geología*, 42(2), 31-48. doi: 10.18273/revbol.v42n2-2020002, 2020.
- Autoridad Regulatoria Nuclear – Presidencia de la Nación Argentina. Second CNS extraordinary meeting Argentine national report. *Convention of Nuclear Safety*, 2012.
- Baxter, P., Sanchez Bettucci, L. and Costa, C. H. Assessing the earthquake hazard around the Río de la Plata estuary (Argentina and Uruguay): Implications for risk assessment. *Journal of South American Earth Sciences* 112, 2021.
- Bertero, A. and Bertero, R.D. Seismic Hazard in Buenos Aires, Argentina, considering the influence of site effects and long-distance earthquakes. *Journal of South American Earth Sciences* 117, 2022.
- SeismoStruct, Software applications for analysis of structures subjected to seismic actions. *SeismoSoft Ltd.*, Pavia, Italy, V. 5.2.2., 2010.
- Madas P., Advanced Modelling of Composite Frames Subjected to Earthquake Loading. PhD Thesis, *Imperial College, University of London*, London, UK, 1993.
- Mander J.B., Priestley M.J.N., Park R., Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 114, No. 8, pp. 1804-1826, 1988.
- Martinez-Rueda J.E., Energy Dissipation Devices for Seismic Upgrading of RC Structures. *PhD Thesis, Imperial College, University of London*, London, UK, 1997.
- CIRSOC 102. *Reglamento Argentino de Acción del Viento Sobre las Construcciones. En discusión pública*, INTI CIRSOC, 2024.