

## CORRECCIÓN DE IRREGULARIDADES TORSIONALES EXTREMAS EN EDIFICIOS, MEDIANTE EL USO DEL AISLAMIENTO SÍSMICO

### CORRECTION OF EXTREME TORSIONAL IRREGULARITIES IN BUILDINGS THROUGH THE USE OF SEISMIC ISOLATION

**Gioacchini Gustavo, Blasco Pablo G., Formica Ricardo G.,  
González Ignacio A., Grasso Gino y Tillar Alejandro D.**

*CeReDeTeC. Centro Regional de Desarrollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología e Ingeniería Sísmica. Facultad Regional Mendoza. Universidad Tecnológica Nacional. Rodríguez 273, 5500, Mendoza, Argentina, ggioacchini@frm.utn.edu.ar; http://www frm.utn.edu.ar*

**Palabras Claves:** aislamiento sísmico, modelo numérico, respuesta estructural, irregularidad torsional.

**Resumen:** La ocurrencia de terremotos en zonas sísmicas densamente pobladas, particularmente en el oeste argentino, ha evidenciado importantes pérdidas humanas y económicas. En este contexto, el aislamiento sísmico se presenta como una estrategia eficaz para disminuir la vulnerabilidad estructural frente a los efectos del movimiento del terreno. Sin embargo, su aplicación en edificaciones con configuraciones estructurales irregulares introduce desafíos adicionales, especialmente vinculados a las demandas torsionales. El presente estudio analiza la respuesta sísmica de una estructura con elevado grado de irregularidad torsional, evaluando la hipótesis de que la incorporación de un sistema de aislamiento sísmico permite reducir dichas irregularidades hasta niveles aceptables según los criterios normativos. Se comparan las respuestas dinámicas de un modelo con base fija y otro aislado mediante dispositivos elastoméricos, considerando diversas configuraciones. Los resultados obtenidos confirman la efectividad del aislamiento sísmico para mitigar las irregularidades torsionales y mejorar el desempeño sísmico global de la estructura.

**Keywords:** seismic isolation, numerical model, structural response, torsional irregularity.

**Abstract:** The occurrence of earthquakes in densely populated seismic zones, particularly in western Argentina, has revealed significant human and economic losses. In this context, seismic isolation emerges as an effective strategy to reduce structural vulnerability to ground motion effects. However, its application in buildings with irregular structural configurations introduces additional challenges, especially those related to torsional demands. This study analyzes the seismic response of a structure with a high degree of torsional irregularity, evaluating the hypothesis that incorporating a seismic isolation system can reduce such irregularities to acceptable levels according to code requirements. The dynamic responses of a fixed-base model and an isolated model using elastomeric bearings are compared under various configurations. The results confirm the effectiveness of seismic isolation in mitigating torsional irregularities and improving the overall seismic performance of the structure.

## 1. INTRODUCCIÓN

La ciudad de Mendoza está ubicada en una zona de elevada peligrosidad sísmica y es una tarea de la ingeniería y del diseño sismo-resistente la protección de la vida, mejorando el comportamiento sísmico de las edificaciones para reducir el colapso. Por ende, una de las estrategias para mejorar el comportamiento de la edificación es el aislamiento sísmico. Este aislamiento permite un control pasivo de la vibración de la estructura, reduciendo la transmisión de las fuerzas sísmicas a la superestructura.

Este proyecto presenta un análisis comparativo de la respuesta sísmica de una edificación hipotética con un elevado grado de irregularidad torsional, utilizando herramientas informáticas de la práctica de la profesión. El estudio compara el comportamiento de la estructura con base fija, con aisladores elastoméricos.

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO BAJO ESTUDIO

A fin de evidenciar un alto grado de irregularidad en planta, evaluado conforme al Reglamento INPRES - CIRSOC 103 - Parte 1 – 2013 (irregularidad torsional extrema), se concibe una estructura teórica. Esta estructura se basa en una planta completamente regular, a la cual se le introducen modificaciones significativas que representan problemas de diseño que deben evitarse en la práctica profesional. El edificio en cuestión consta de 6 niveles, con una altura de 20,0 m y una superficie cubierta aproximada de 733,36 m<sup>2</sup>, siendo la tipología estructural elegida Pórticos Sismorresistentes de Hormigón Armado en la dirección “X” y Tabiques de Hormigón Armado en la dirección “Y”. Este edificio se ubicará en la zona sísmica 4 del territorio nacional. En cada nivel se plantea un sistema de losas macizas armadas en 2 direcciones que se comportan como diafragmas rígidos (véase la Fig. 1).

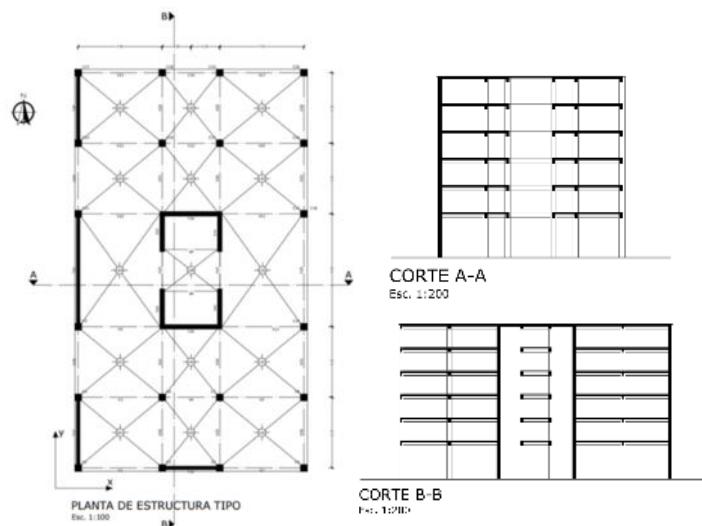


Figura 1: Planta de estructura tipo y elevaciones (Corte A-A, Corte B-B).

## 2.1. Modelado estructural

Se modeló un edificio de seis niveles con estructura de hormigón armado utilizando un software de uso comercial. La geometría fue definida a partir de planos y los materiales se asignaron según CIRSOC 201 (INPRES-CIRSOC 201 2005). Las condiciones de borde, cargas gravitacionales y combinaciones sísmicas se aplicaron conforme al CIRSOC 103 (INPRES-CIRSOC 103 2018).

## 2.2. Métodos para la evaluación de la acción sísmica

La elección del método depende del destino de la construcción, la altura y el grado de regularidad. Los métodos considerados en el Reglamento INPRES-CIRSOC 103 - Parte I son:

- i. Verificación simplificada.
- ii. Método estático.
- iii. Métodos dinámicos (Análisis modal espectral – Análisis dinámico de historia en el tiempo/Time-History).

## 2.3. Método adoptado para la evaluación de la acción sísmica

Dado que la construcción no cumple con las condiciones estipuladas en la tabla 2.5 (IC103-P1), debido al grado de irregularidad en planta que presenta el edificio, no es aplicable el método estático para su evaluación sísmica. Por esta razón, se optará por la aplicación del método dinámico de Análisis modal espectral para su evaluación (véase la Tabla 1).

Zona sísmica	Altura máxima de la Construcción (m)			Regularidad en planta Tabla 2.3 – Línea			Regularidad en altura Tabla 2.4 – Línea		
	A <sub>o</sub>	A	B	A <sub>o</sub>	A	B	A <sub>o</sub>	A	B
3 y 4	12	30	45	1 <sub>a</sub> , 3 <sub>a</sub> 4 <sub>a</sub>	1 <sub>b</sub> , 4 <sub>a</sub>	1 <sub>b</sub>	1 <sub>a</sub> , 2, 3, 5 <sub>a</sub>	1 <sub>b</sub> , 2, 3, 5 <sub>a</sub>	1 <sub>b</sub> , 2, 3, 5 <sub>a</sub>
0*, 1 y 2	16	45	60	1 <sub>b</sub>	1 <sub>b</sub>	1 <sub>b</sub>	1 <sub>a</sub> , 2, 3	1 <sub>b</sub> , 2, 3	1 <sub>b</sub> , 2, 3

Tabla 1: Condiciones para la aplicación del método estático.

## 3. DETERMINACIÓN DE LA IRREGULARIDAD DEL EDIFICIO DE BASE FIJA

Se determina la irregularidad torsional del edificio haciendo uso de un análisis dinámico modal espectral. Utilizando la combinación cuadrática completa (CQC) se obtuvieron mediante el software de uso comercial los diferentes períodos y modos de vibración de la estructura planteada, de los cuales se pueden destacar los valores resultantes de los primeros 3 modos:

- Modo 1: rotacional en Z, con una masa participativa del 30,89% y periodo de 0,578s.
- Modo 2: translacional en X, con una masa participativa del 46,5% y periodo de 0,439s.

- Modo 3: translacional en Y, con una masa participativa del 38,8% y periodo de 0,264s.

### 3.1. Evaluación de la regularidad torsional

En función de lo indicado por el reglamento y sus comentarios (I-C 103-P1, cap. 2.6.1), el grado de irregularidad torsional se determina de forma cuantitativa al comparar los desplazamientos relativos de piso de los bordes de la construcción con el desplazamiento promedio, obtenidos del análisis modal espectral para cada nivel y para cada dirección de análisis por separado (véase la Tabla 2) (INPRES-CIRSOC 103 2018).

CONDICIONES							Ver Sección
1a	Son estructuras torsionalmente regulares o con irregularidad torsional baja cuando en todos los niveles o masas se cumple: $\Delta_{ok} / \Delta_{mk} \leq 1,2$						
1b	Son estructuras con irregularidad torsional media cuando en algún nivel o masa se cumple: $1,2 < \Delta_{ok} / \Delta_{mk} \leq 1,4$						
1c	Son estructuras con irregularidad torsional extrema cuando en algún nivel o masa se cumple: $\Delta_{ok} / \Delta_{mk} \geq 1,4$						2.6.3- a)

Tabla 2: Condiciones de regularidad en planta.

Los resultados evidencian problemas de irregularidad torsional en ambas direcciones para el diseño en planta propuesto (irregularidad torsional extrema según tabla 2). En virtud de esto, y a partir de lo dispuesto en la tabla C.2.1 de los comentarios de los capítulos 6 y 7 del reglamento I-C103 - P1, el edificio cae en la zona de rediseño (véase la Tabla 3).

Tipo de regularidad	Línea	Condición de regularidad	Línea	Caso	Zonas Sísmicas 3 y 4		Zonas Sísmicas 0, 1 y 2	
					A <sub>0</sub>	A	B	A <sub>0</sub>
					E	E	E	E
Regularidad en Planta Tabla 2.3.	1	Torsional	1a	Regular	E	E	E	E
			1b	Irregularidad Media	D	E	E	E
			1c	Irregularidad Extrema	R	R	R	D
	2	Continuidad de Elementos	2a	Regular	E	E	E	E
			2b	Irregular	E	E	E	E
	3	Ortogonalidad	3a	Regular	E	E	E	E
			3b	Irregular	E	E	E	E
	4	Esquinas entrantes	4a	Regular	E	E	E	E
			4b	Irregular	D	D	E	E
Regularidad en Altura Tabla 2.4.	1	Rigidez	1a	Regular	E	E	E	E
			1b	Irregularidad Media	D	E	E	E
			1c	Irregularidad Extrema	R	R	R	D
	2	Masas	Regular	E	E	E	E	E
			Irregular	D	D	D	D	E
	3	Dimensiones Horizontales	Regular	E	E	E	E	E
			Irregular	D	D	D	D	E
	4	Retranqueos en su Plano	4a	Regular	E	E	E	E
			4b	Irregular	E	E	E	E
	5	Resistencia Horizontal	5a	Regular	E	E	E	E
			5b	Irregular	R	R	R	D

E: Método Estático; D: Métodos Dinámicos; R: Rediseñar la Estructura

Tabla 3: Condiciones de regularidad en planta y altura.

#### 4. DISEÑO DEL SISTEMA DE AISLAMIENTO

Se extraen, del análisis estructural del edificio, los valores de las reacciones en las bases analizado para la combinación de carga más desfavorable. La carga máxima obtenida por análisis estructural es:  $P = 7750,00 \text{ kN}$ . En función de esta carga, se seleccionará el diámetro del aislador (Gioacchini et al 2023).

Por lo tanto, del catálogo de DIS (DIS Company 2024) se obtienen los siguientes rangos para los diferentes parámetros de diseño (véase la Tabla 4):

Diámetro del aislador [mm]	Propiedades de diseño			Desplazamiento máximo $D_{max}$ [mm]	Capacidad axial $P_u$ [kN]
	Rigidez en fluencia $K_d$	Resistencia característica $Q_d$	Rigidez a compresión $K_v$		
1050	0,9-2,1	0-580	>2100	710	8500

Tabla 4: Parámetros de diseño de aisladores LRB.

A partir de los parámetros de referencia y de las ecuaciones propuestas por el catálogo de DIS, se dimensionaron para el proyecto los siguientes aisladores (véase la Tabla 5):

Parámetros de diseño	LRB0	LRB1	LRB2	LRB3	LRB4	LRB5
Diámetro del aislador [mm]	1050	1050	1050	1050	1050	1050
Rigidez en fluencia $K_d$ [kN/mm]	0,90	0,90	1,20	1,50	2,10	2,10
Rigidez elástica $K_e$ [kN/mm]	9,00	9,00	12,00	15,00	21,00	63,00
Resistencia característica $Q_d$ [kN]	150	150	150	150	300	580
Rigidez a compresión $K_v$ [kN/mm]	2100	2100	2100	2100	2100	2100
Amortiguamiento vertical $C_v$	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Desplazamiento de fluencia $D_f$ [mm]	12,35	18,52	13,89	11,11	7,94	10,23
Fuerza de fluencia $F_y$ [kN]	111,11	166,67	166,67	166,67	166,67	644,44
Rigidez efectiva $K_{eff}$ [kN/mm]	1,23	1,40	1,70	2,00	2,60	8,23
Amortiguamiento efectivo $C_{eff}$	0,16	0,21	0,18	0,15	0,12	0,14

Tabla 5: Parámetros obtenidos del diseño de los aisladores LRB

#### 5. RESULTADOS

Se extrajeron los valores de períodos, masa participativa, y distorsiones de piso, tanto para el edificio de base fija como el de aislada, con el fin de obtener una comparación cuantitativa y diferencias entre las respuestas estructurales. Cabe recordar que se utilizará un análisis modal espectral, con sismos dinámicos tanto en dirección de X como de Y.

### 5.1. Respuesta con aisladores elastoméricicos con núcleo de plomo (LRB)

A partir de los aisladores diseñados, se procederá a encontrar una distribución óptima de aisladores sobre la base, inclusive hacer utilización de patines, con el objetivo de encontrar la mejor respuesta estructural posible y disminuir la irregularidad torsional. La distribución final de los aisladores se alcanza tras realizar un proceso iterativo exhaustivo, en el que se evaluaron diferentes configuraciones y parámetros de los aisladores. En dicha distribución, los aisladores con mayor rigidez se ubicaron estratégicamente en las caras del edificio que presentan tabiques, es decir, en las zonas con mayor rigidez estructural. Por otro lado, en las caras del edificio con menor rigidez estructural se instalaron aisladores de características de menor rigidez.

Además, en la base de los tabiques que conforman el núcleo rígido del ascensor y las escaleras, se optó por la colocación de patines. Estos dispositivos se caracterizan por su baja rigidez en la dirección horizontal y alta rigidez en la dirección vertical, lo que los hace idóneos para soportar cargas verticales significativas sin comprometer el desplazamiento horizontal controlado. La modelación de estos patines se realizó por medio de un software de uso comercial, utilizando un vínculo de segunda especie o apoyo fijo, lo que permite simular de manera precisa el comportamiento de estos bajo condiciones de carga (véase la Fig. 2).

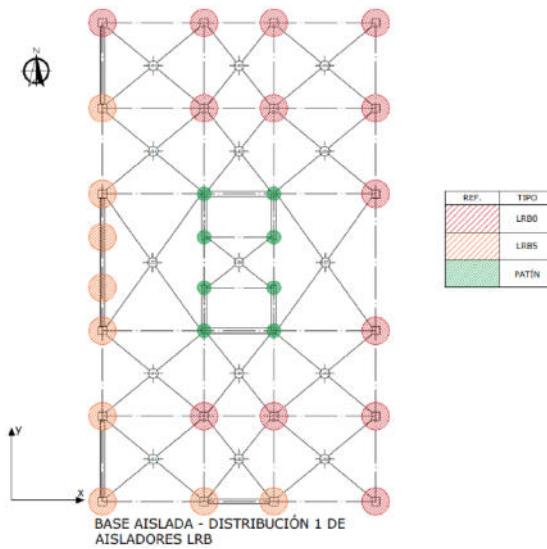


Figura 2: Disposición de aisladores LRB en planta.

### 5.2. Evaluación de la irregularidad torsional (análisis modalpectral en X)

- Se aprecia una reducción promedio de la irregularidad torsional del 21% (véase las Tablas 6 y 7; y los Gráficos 1 y 2).

Análisis modal espectral en "x" (SDX)								
Desplazamientos extremos en la dirección "x"								
Nivel	h [mm]	$\Delta_{x\text{-max}}$ [mm]	$\Delta_{x\text{-min}}$ [mm]	$\Delta_{bk}$ [mm]	$\Delta_{mk}$ [mm]	G° de irregularidad	Irreg. Base fija	% reducción de la irregularidad
Base	0	171,28	115,02					
Piso 1	5000	175,29	118,81	4,006	3,898	1,028	1,337	23,14%
Piso 2	3000	178,53	121,76	3,244	3,099	1,047	1,306	19,88%
Piso 3	3000	181,90	124,85	3,369	3,231	1,043	1,280	18,50%
Piso 4	3000	185,15	127,92	3,256	3,162	1,030	1,255	17,94%
Piso 5	3000	188,17	130,86	3,014	2,978	1,012	1,229	17,62%
Piso 6	3000	190,84	133,61	2,750	2,709	1,015	1,198	15,30%

Tabla 6: Desplazamientos extremos en la dirección X para el análisis modal en X.



Gráfico 1: Grado de irregularidad por piso en la dirección X para el análisis modal en X.

Análisis modal espectral en "y" (SDX)								
Desplazamientos extremos en la dirección "y"								
Nivel	h [mm]	$\Delta_{y\text{-max}}$ [mm]	$\Delta_{y\text{-min}}$ [mm]	$\Delta_{bk}$ [mm]	$\Delta_{mk}$ [mm]	G° de irregularidad	Irreg. Base fija	% reducción de la irregularidad
Base	0	82,11	57,98					
Piso 1	5000	84,34	59,02	2,237	1,637	1,367	1,812	24,58%
Piso 2	3000	86,14	59,80	1,800	1,291	1,394	1,810	22,97%
Piso 3	3000	87,94	60,60	1,793	1,298	1,382	1,806	23,47%
Piso 4	3000	89,61	61,39	1,668	1,227	1,360	1,802	24,54%
Piso 5	3000	91,10	62,14	1,495	1,123	1,332	1,797	25,87%
Piso 6	3000	92,40	62,84	1,299	0,999	1,300	1,795	27,39%

Tabla 7: Desplazamientos extremos en la dirección Y para el análisis modal en X.



Gráfico 2: Grado de irregularidad por piso en la dirección Y para el análisis modal en X.

### 5.3. Evaluación de la irregularidad torsional (análisis modal espectral en Y)

- Se aprecia una reducción promedio de la irregularidad torsional del 19% (véase las Tablas 8 y 9; y los Gráficos 3 y 4).

Nivel	h [mm]	Análisis modal espectral en "y" (SDY) Desplazamientos extremos en la dirección "x"						
		$\Delta_{y\text{-max}}$ [mm]	$\Delta_{y\text{-min}}$ [mm]	$\Delta_{\text{pk}}$ [mm]	$\Delta_{\text{pk}}$ [mm]	G° de irregularidad	Irreg. Base fija	% reducción de la irregularidad
	Base	126,707	96,492	3,728	3,633	1,026	1,534	33,11%
Piso 1	5000	130,435	100,029	3,728	3,633	1,026	1,534	33,11%
Piso 2	3000	133,318	102,711	2,883	2,783	1,036	1,522	31,91%
Piso 3	3000	136,199	105,444	2,881	2,807	1,026	1,499	31,55%
Piso 4	3000	138,875	108,075	2,676	2,653	1,008	1,477	31,74%
Piso 5	3000	141,264	110,535	2,460	2,425	1,015	1,453	30,15%
Piso 6	3000	143,311	112,778	2,243	2,145	1,046	1,429	26,52%

Tabla 8: Desplazamientos extremos en la dirección X para el análisis modal en Y.

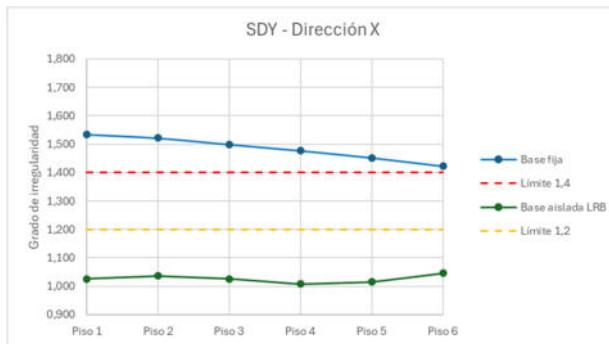


Gráfico 3: Grado de irregularidad por piso en la dirección X para el análisis modal en Y.

Nivel	h [mm]	Análisis modal espectral en "y" (SDY) Desplazamientos extremos en la dirección "y"						
		$\Delta_{y\text{-max}}$ [mm]	$\Delta_{y\text{-min}}$ [mm]	$\Delta_{\text{pk}}$ [mm]	$\Delta_{\text{pk}}$ [mm]	G° de irregularidad	Irreg. Base fija	% reducción de la irregularidad
	Base	158,411	104,555	3,745	2,784	1,345	1,503	10,49%
Piso 1	5000	162,156	106,378	3,745	2,784	1,345	1,503	10,49%
Piso 2	3000	165,27	107,765	3,114	2,251	1,384	1,481	6,58%
Piso 3	3000	168,377	109,188	3,107	2,265	1,372	1,459	5,96%
Piso 4	3000	171,266	110,582	2,889	2,141	1,349	1,437	6,15%
Piso 5	3000	173,851	111,914	2,585	1,959	1,320	1,413	6,61%
Piso 6	3000	176,101	113,164	2,250	1,750	1,286	1,385	7,18%

Tabla 9: Desplazamientos extremos en la dirección Y para el análisis modal en Y.

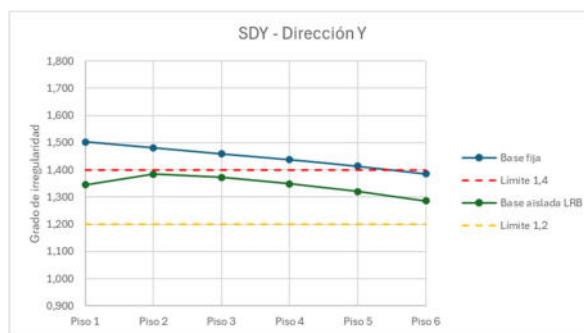


Gráfico 4: Grado de irregularidad por piso en la dirección Y para el análisis modal en Y.

## 6. CONCLUSIONES

La adecuada distribución de los aisladores fue un factor clave en la reducción del grado de irregularidad torsional. La disposición de aisladores de mayor rigidez en las caras del edificio con mayor rigidez estructural (presencia de tabiques) y la colocación de aisladores más flexibles en los planos menos rígidos de la super estructura permitió equilibrar los desplazamientos laterales, minimizando el efecto torsional. Esta estrategia contribuyó directamente a corregir la irregularidad torsional. A partir de esto, se puede concluir que, si el centro de rigidez del sistema de aislamiento está próximo al centro de rigidez de la superestructura, la torsión se reduce de manera significativa. Además, si el sistema de aislamiento presenta una flexibilidad considerable, esta reducción en la torsión es aún mayor.

La implementación del aislamiento sísmico de base con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) permitió una reducción promedio del 20% para cada dirección del análisis modal espectral. Esta mejora modificó la clasificación de irregularidad torsional de extrema a media, logrando así el principal objetivo del estudio: evitar la necesidad de un rediseño del edificio originalmente propuesto.

Possiblemente la distribución planteada para el sistema de aislamiento resulte no ser la disposición que corresponda al máximo desempeño probable. Sin embargo, los resultados muestran que tanto el sistema de aislamiento sísmico seleccionado como su distribución y características han sido efectivas en la mitigación de la irregularidad torsional, mejorando tanto la seguridad estructural como el cumplimiento del código sismorresistente de aplicación en Argentina.

## 7. REFERENCIAS

- DIS Company, 2024: *LRB Design Parameters*. DIS Company, Tokyo, Japan. Available online at: <https://www.discompany.com/LRB-Design-Parameters>
- Gioacchini G., Tornello M., Zevallos M., Rodriguez J., 2023. *Manufactura y caracterización de aisladores sísmicos con placas de acero y deformación vertical controlada*. XIII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica - ACHISINA. Viña del Mar, Chile.
- INPRES-CIRSOC, 2018. *Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes (CIRSOC 103)*. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Buenos Aires, Argentina.
- INPRES-CIRSOC, 2005. *Reglamento Argentino para Estructuras de Hormigón (CIRSOC 201)*. Instituto Nacional de Prevención Sísmica, Buenos Aires, Argentina.