

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESPUESTA DINÁMICA NO LINEAL DE UNA ESTRUCTURA SISMORRESISTENTE CON AISLACIÓN DE BASE

### STATISTICAL ANALYSIS OF THE NON-LINEAR DYNAMIC RESPONSE OF AN EARTHQUAKE-RESISTANT STRUCTURE WITH BASE ISOLATION

Oscar Möller, Germán Lucero y Juan P. Ascheri

*Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad 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)*

**Palabras clave:** Análisis estadístico, Acción sísmica, Dinámica no lineal, Aislación de base.

**Resumen.** Una estrategia para reducir la vulnerabilidad de las construcciones ubicadas en zonas de alta peligrosidad sísmica es la aislación de base que aumenta el periodo fundamental de vibración, disminuyendo la demanda de pseudoaceleraciones, y puede incrementar el amortiguamiento en función de los dispositivos utilizados, produciendo otra reducción adicional de la acción sísmica. Se estudia una estructura tridimensional para edificio de hormigón armado de 3 pisos con aislación de base dimensionada con el método estático. Se utiliza análisis dinámico no lineal para el sistema modelado en OpenSees bajo la acción de las 3 componentes simultáneas para 15 acelerogramas registrados compatibles con el espectro de diseño del INPRES-CIRSOC 103 amplificadas al terremoto máximo considerado. Se obtienen resultados para límites superior e inferior de los parámetros de los aisladores, y con dos criterios de dimensionamiento de la superestructura. Se observan importantes variaciones en los parámetros de respuesta y para poder representarla se aplica análisis estadístico calculando estadísticos de la muestra, ajuste de funciones de densidad de probabilidades e intervalos de confianza. Las conclusiones son de interés para poder utilizar análisis de confiabilidad.

**Keywords:** Statistical analysis, Seismic action, Non-linear dynamics, Base isolation.

**Abstract.** A strategy to reduce the vulnerability of buildings located in areas of high seismic hazard is base isolation that increases the fundamental period of vibration, decreasing the demand for pseudo-accelerations, and can increase damping depending on the devices used, producing another additional reduction of the seismic action. A three-dimensional structure for a 3-story reinforced concrete building with base insulation dimensioned with the static method is studied. Nonlinear dynamic analysis is used for the system modeled in OpenSees under the action of the 3 simultaneous components for 15 registered accelerograms compatible with the INPRES-CIRSOC 103 design spectrum amplified to the maximum earthquake considered. Results are obtained for upper and lower limits of the isolator parameters, and with two dimensioning criteria of the superstructure. Significant variations in the response parameters are observed and in order to represent it, statistical analysis is applied by calculating sample statistics, adjustment of probability density functions and confidence intervals. The conclusions are of interest to be able to use reliability analysis.

## 1 INTRODUCCIÓN

Para reducir la vulnerabilidad de las construcciones ubicadas en zonas de alta peligrosidad sísmica, se han desarrollado en las últimas décadas sistemas de aislación de base (Naeim and Kelly, 1999; Skinner, 1993, Christopoulos, 2006, Nassani, 2015) y otras de disipación de energía mediante la incorporación de dispositivos especiales (Zhang, 2021). Estas estrategias se complementan con el dimensionamiento por capacidad donde se elige un mecanismo de disipación de energía con regiones, “rótulas plásticas”, preparadas para incursionar en el campo no lineal. Como este tipo de comportamiento no lineal produce daños en esas regiones que pueden ser difíciles y costosas de reparar, la complementación con el sistema de aislación de base o disipación de energía consiste en reducir fuertemente las posibles incursiones no lineales en las “rótulas plásticas”.

Los aisladores de base generan las siguientes ventajas con respecto al diseño con base fija: (a) El periodo fundamental de vibración del sistema aumenta, reduciendo significativamente la demanda de pseudoaceleraciones; (b) Se puede incrementar el amortiguamiento en función de los dispositivos utilizados, produciendo otra reducción adicional de la acción sísmica. (c) Los desplazamientos totales se incrementan, pero se disminuyen las distorsiones de piso.

Significa que el aislamiento sísmico se basa en el concepto de reducir la demanda sísmica en lugar de aumentar la capacidad resistente. Se aceptan métodos simplificados de diseño como el método estático equivalente, con la incorporación de factores específicos para sistemas de aislamiento y su mayor aplicación es para edificios con un periodo fundamental de 1 segundo o menos (Falborski 2017).

En este trabajo se analiza la respuesta dinámica no lineal de una estructura para edificio de hormigón armado de 3 pisos con aislación de base, dimensionada con el método estático siguiendo los lineamientos de ASCE 7-16. El modelo numérico se realiza utilizando OpenSees, y la acción sísmica se representa con un conjunto de 15 acelerogramas registrados, con las 3 componentes simultáneas de cada uno, escalados adecuadamente para ser compatibles con el espectro de diseño del código INPRES-CIRSOC 103 amplificado para el terremoto máximo considerado (TMC).

Se representa la variabilidad de los parámetros de respuesta mediante análisis estadístico calculando estadísticos de la muestra, ajuste de funciones de densidad de probabilidades e intervalos de confianza (Nikoo and Zarfam, 2012), para desplazamientos, distorsión de aisladores, distorsiones de piso e índice de daños de la superestructura.

## 2 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA

### 2.1 Diseño geométrico

La Figura 1 presenta la estructura de 3 pisos utilizada como ejemplo para el análisis de la estadística de los parámetros de respuesta. Se muestra la planta y corte general con un aislador de base por columna.

### 2.2 Diseño del sistema de aislamiento

El sistema de aislamiento se diseña para resistir el desplazamiento máximo  $D_M$ , para la dirección determinante de la respuesta horizontal. Se calcula a partir:

$$D_M = \frac{g S_{M1} T_M}{4 \pi^2 B_M} \quad (1)$$

Donde:  $S_{MI}$  es la ordenada de pseudoaceleración del TMC, para 5% de amortiguamiento y para período de 1 seg.;  $T_M = 2.6$  seg es el periodo efectivo propuesto para la estructura aislada para el desplazamiento  $D_M$  ;  $B_M$  es el coeficiente de amortiguamiento que depende del amortiguamiento efectivo  $\beta_M = 20\%$ , valor que depende del tipo de aislador utilizado.

Se considera el desplazamiento adicional por torsión función de las excentricidades entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, pero el desplazamiento total debe ser  $D_{TM} \geq 1.15 D_M$  .

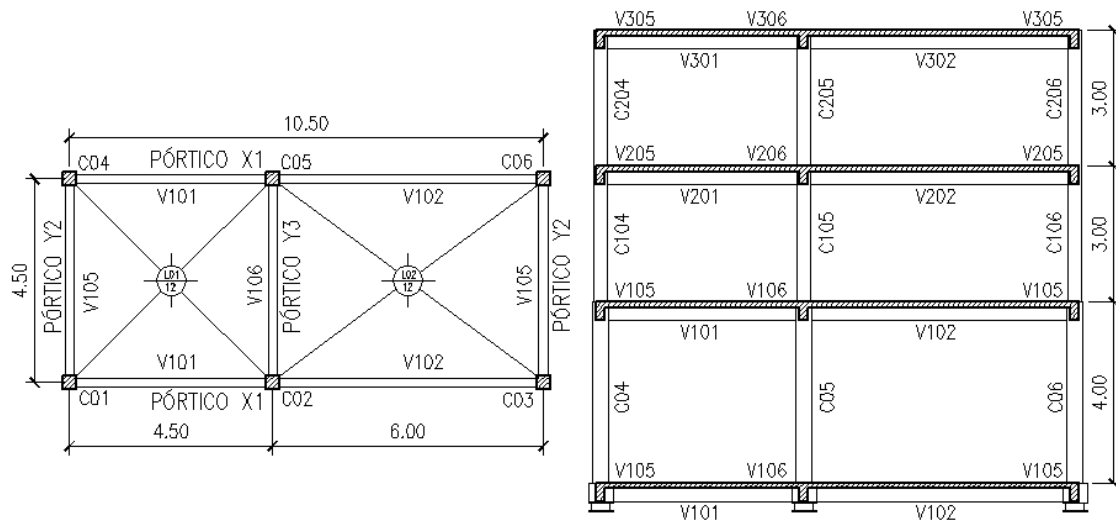


Figura 1: Planta y corte de la estructura aislada

El diseño y dimensionado del sistema de aislamiento es un proceso iterativo. Se utiliza un aislador del tipo HDR (High Damping Rubber), cuyas propiedades mecánicas se obtienen del catálogo de aisladores de Bridgestone. Con el periodo  $T_M$  y la masa del edificio se obtiene la rigidez efectiva que tiene que tener el sistema de aislamiento para el desplazamiento  $D_M$  . Para este ejemplo, los valores para cada uno de los 6 aisladores, resultan:  $D_{ext} = 550$  mm;  $D_{int} = 15$  mm; Altura de la goma  $Hr = 250$  mm. Las propiedades de rigidez y resistencia se modifican para tener en cuenta la variación de los parámetros de diseño nominales por los efectos de calentamiento causados por el movimiento dinámico cíclico, la velocidad de carga, el envejecimiento, la temperatura, exposición ambiental y contaminación. Los resultados de límites inferior y superior se presentan en la Tabla 1.

### 2.3 Diseño de la superestructura con método estático

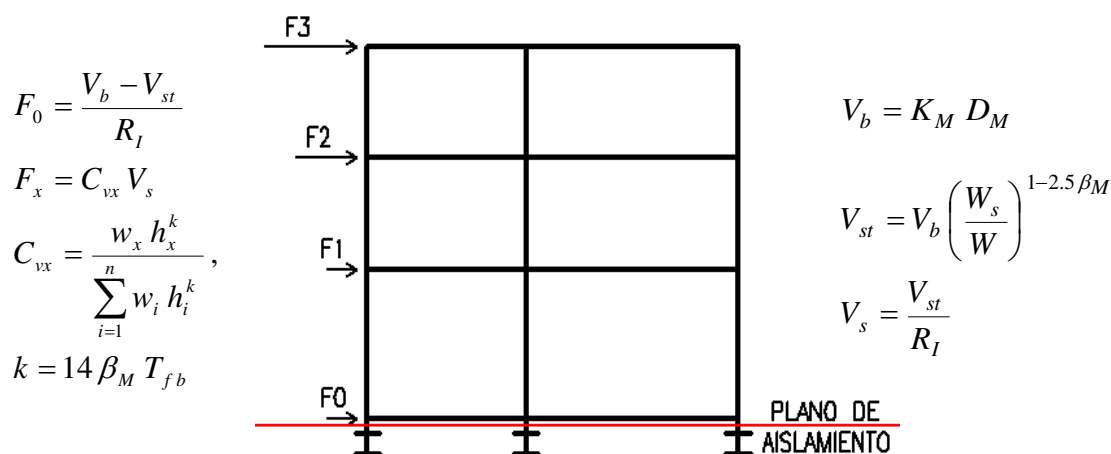
Los desplazamientos laterales de diseño y las fuerzas sobre las estructuras aisladas sísmicamente son función de las deformaciones del sistema de aislamiento. En este trabajo, su evaluación se realiza siguiendo los lineamientos del ASCE 7-16, cap.17. Se selecciona el procedimiento de Fuerzas Laterales Equivalentes, ya que se cumplen los requerimientos para su aplicación. Se consideran las cargas verticales reglamentarias, cargas permanente D, sobrecarga L, con sus valores nominales del Reglamento CIRSOC 101.

La acción sísmica se evalúa a partir del terremoto máximo considerado (TMC), definido con una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años, equivalente a un período de retorno de 2475 años. El TMC se obtiene amplificando el espectro del terremoto de diseño (TD), definido por el INPRES-CIRSOC 103 Parte I, por un factor 1.5 para la zona sísmica 4, que es donde está ubicada la estructura.

Parámetro	Lím Inferior	Nominal	Lím Superior
Desplazamiento máximo $D_M$ [m]	0.488	0.415	0.345
Desplazamiento de fluencia $D_y$ [m]	0.0185	0.0185	0.0185
Rigidez efectiva $K_{eff}$ [kN/m]	194.6	216.5	238.5
Rigidez elástica $K_e$ [kN/m]	1312.3	1545.2	1852.6
Rigidez post fluencia $K_d$ [kN/m]	131.2	154.5	185.3
Periodo $T_M$ [seg]	2.922	2.635	2.340
Fuerza máxima $F_M$ [kN]	85.87	89.71	94.88
Fuerza de fluencia $F_y$ [kN]	24.32	28.62	34.33
Fuerza característica $Q_d$ [kN]	21.90	25.76	30.91
Amortiguamiento efectivo $\beta_M$ [%]	15.61	17.50	19.62
Coefficiente de amortiguamiento $B_M$	1.58	1.67	1.78

**Tabla 1:** Resumen del límite inferior, valor nominal y límite superior para un aislador

El sistema de fuerzas estáticas equivalentes se muestra en la Figura 2



**Figura 2:** Fuerzas estáticas equivalentes al movimiento sísmico

Se realizan dos tipos de dimensionamiento de la superestructura: (a) Comportamiento con ductilidad limitada, factor de reducción máximo  $R = 2$ , y cálculo de armaduras longitudinales y transversales aplicando IC-103, Parte II; (b) Comportamiento esencialmente elástico, factor de reducción  $R = 1.5$ , y cálculo de armaduras con CIRSOC 201. Las dimensiones que resultan para los elementos de la superestructura se presentan en la Tabla 2.

Nivel	Piso 1			Pisos 2 y 3		
Diseño	Col esquina	Col central	Vigas	Col esquina	Col central	Vigas
IC-103	40x40	30x30	20 / 40	35x35	30x30	20 / 40
CIRSOC 201	45x45	35x35	20 / 45	40x40	35x35	20 / 40

**Tabla 2:** Dimensiones de los elementos de la superestructura

### 3 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL

#### 3.1 Modelo en OpenSees

Se utiliza el software de libre acceso OpenSees (2020), ver Mazzoni (2005), Makenna (2010), especialmente desarrollado para modelizar sistemas solicitados por acción sísmica. Para las vigas y columnas se utilizan elementos tipo “element forceBeamColumn”. Las losas son consideradas como diafragmas rígidos en su plano utilizando restricciones “Multi-Point Constraint objects” mediante “rigidDiaphragm”. Los aisladores se modelizan con “element elastomericBearingBoucWen”. Los detalles de la discretización, materiales no lineales, secciones, integración numérica, modelo para los aisladores, etc., se encuentran en Möller y otros (2022).

#### 3.2 Acelerogramas registrados

De la base de datos de PEER (2019) se seleccionaron 15 registros de terremotos ocurridos con el criterio que la forma del espectro de respuesta sea similar al espectro del TD. De cada registro se elige la componente horizontal de mayor aceleración máxima ( $a_G$ ) y se le aplica un factor para que  $a_G = 0.35g$  compatible con IC103. El mismo factor se aplica a la componente vertical. Luego este conjunto de acelerogramas se vuelve a escalar con un único factor  $F = 2.50$  para que el espectro medio de los SSRS de las componentes horizontales se aproxime al espectro objetivo (TMC) dentro del rango de períodos de interés, ver Figura 3.

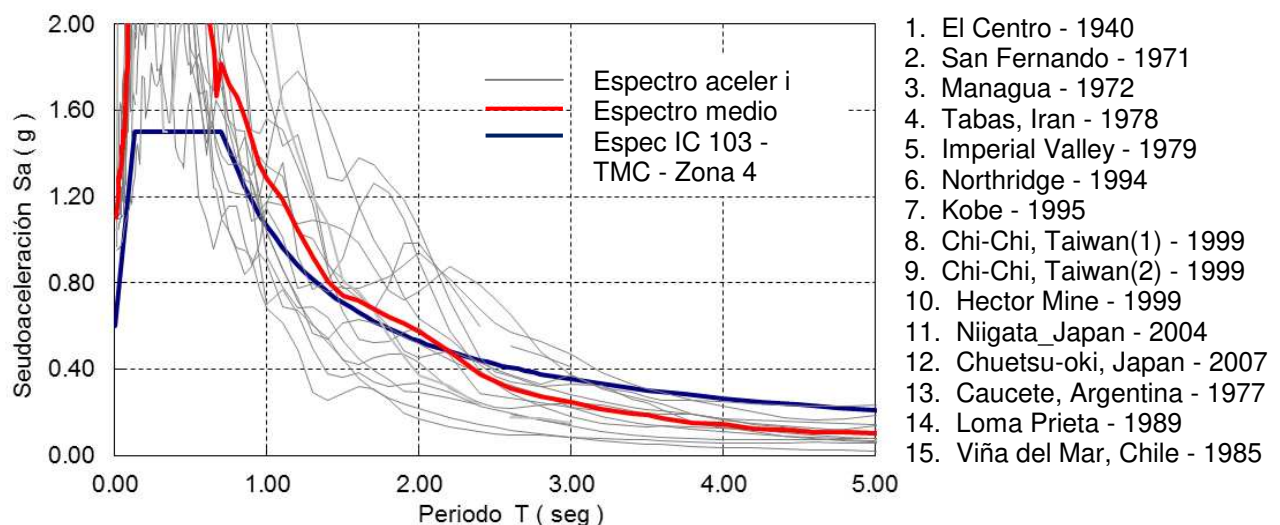


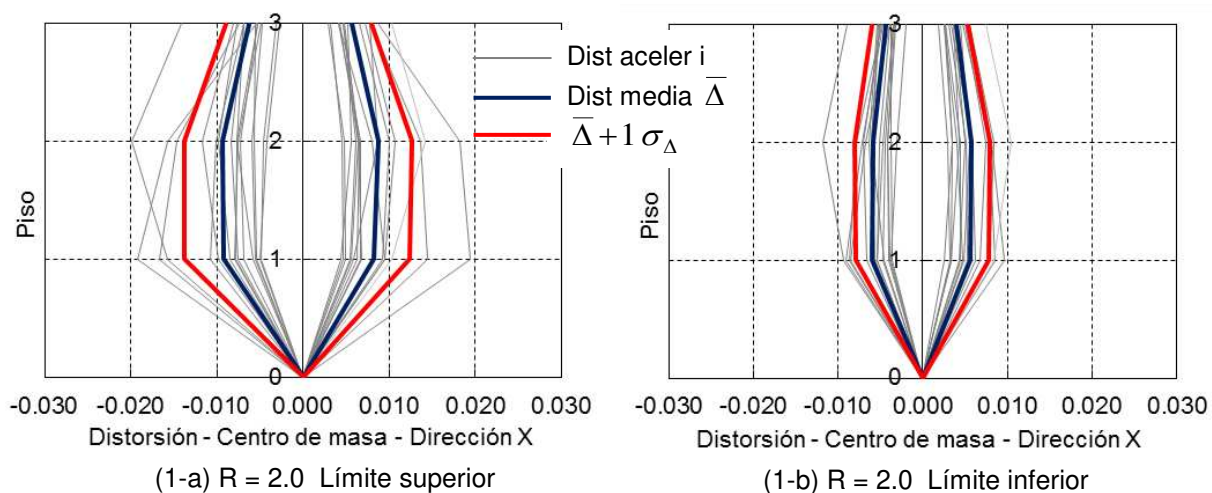
Figura 3: Espectro de los acelerogramas escalados y espectro de diseño

#### 3.3 Resultados del análisis numérico

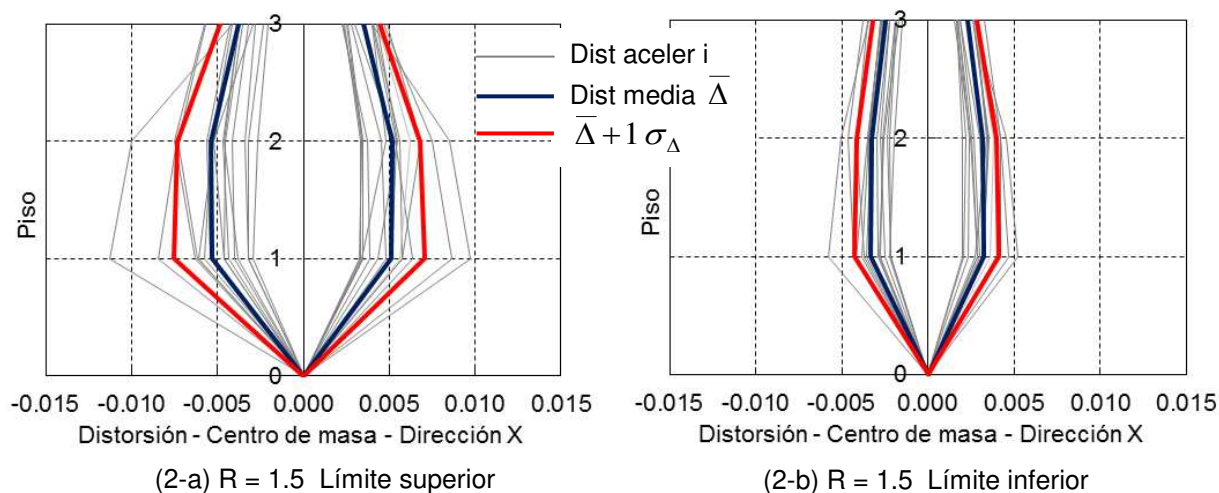
De acuerdo con los tipos de dimensionamiento de la superestructura se analizaron los siguientes casos: (1) TMC y diseño con IC-103 ductilidad limitada,  $R = 2$ , con las variantes (1-a) Límite superior de los parámetros de aisladores  $\alpha = 1.20$ , (1-b) Límite inferior  $\alpha = 0.85$ ; (2) TMC y diseño con CIRSOC 201,  $R = 1.5$ , con las variantes (2-a) Límite superior de los parámetros de aisladores, (2-b) Límite inferior.

Se realizó el análisis dinámico no lineal para cada uno de los terremotos con las 3 componentes simultáneas, y para cada caso de diseño (1-a), (1-b), (2-a) y (2-b). Los resultados más significativos obtenidos son: Aisladores: desplazamiento con esfuerzo axial ( $d_{max}$ , N),

(d, Nmax), (d, Nmin), donde  $d = \sqrt{d_x^2 + d_y^2}$ ; Superestructura: desplazamientos máximos en dirección X e Y en nivel arriba de los aisladores y en el último piso; Distorsiones de piso en X e Y; Índice de daño de Park y Ang (1985) global para la estructura y local máximo en extremo de vigas y columnas. Se muestra en las Figuras 4 y 5 los resultados para la distorsión de pisos



**Figura 4:** Distorsiones de piso para diseño con IC103-II, ductilidad limitada  $R = 2$   
Límites superior e inferior de los parámetros de los aisladores



**Figura 5:** Distorsiones de piso para diseño con CIRSOC 201  $R = 1.5$   
Límites superior e inferior de los parámetros de los aisladores

Los resultados muestran una dispersión significativa entre los 15 terremotos procesados, aun cuando todos están escalados a  $a_G = 0.35 g$  para la zona 4 estudiada. Sin embargo, la variabilidad de los resultados se debe a las diferencias de ordenadas espectrales en los periodos dominantes de la respuesta, ver Figura 3. También se observa una importante diferencia entre el diseño con IC103 ductilidad limitada y CIRSOC 201 comportamiento esencialmente elástico, que por requerir mayor resistencia, es más rígido y las distorsiones de piso se reducen a la mitad aproximadamente. Se destaca especialmente la importancia de los valores de los parámetros de diseño de los aisladores, produciendo en este ejemplo una diferencia del doble entre los resultados para el límite superior con respecto al límite inferior, donde la mayor flexibilidad reduce significativamente las acciones sobre la superestructura.

## 4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESPUESTA

### 4.1 Consideraciones generales

El análisis estadístico permite cuantificar y representar la variabilidad de los resultados, que es la información necesaria para luego poder realizar análisis de confiabilidad estructural, evaluación de probabilidades de falla o de exceder estados límites, para tomar decisiones sobre el diseño final.

Se construye el histograma de la muestra de los 15 acelerogramas para cada parámetro de respuesta analizado. Se calculan los estadísticos valor medio y desvío estándar de la muestra y se proponen funciones de densidad de probabilidades que representen los histogramas. Se aplican las pruebas de bondad de ajuste de Chi-Cuadrado (Hines y Montgomery, 1996) y de Kolmogorov- Smirnov a las funciones de densidad de probabilidades Normal y Lognormal. También se calculan los intervalos de confianza 0.90 para el valor medio y el desvío estándar de la muestra, que significa que el valor medio y el desvío estándar de la población, desconocidos, tienen una probabilidad del 90% de estar dentro de esos intervalos.

### 4.2 Resultados numéricos

Las Figuras 6 y 7 muestran los histogramas con sus límites inferior y superior, las funciones de densidad de probabilidades Normal y Lognormal, y pruebas de bondad de ajuste para algunos de los resultados obtenidos del análisis dinámico no lineal.

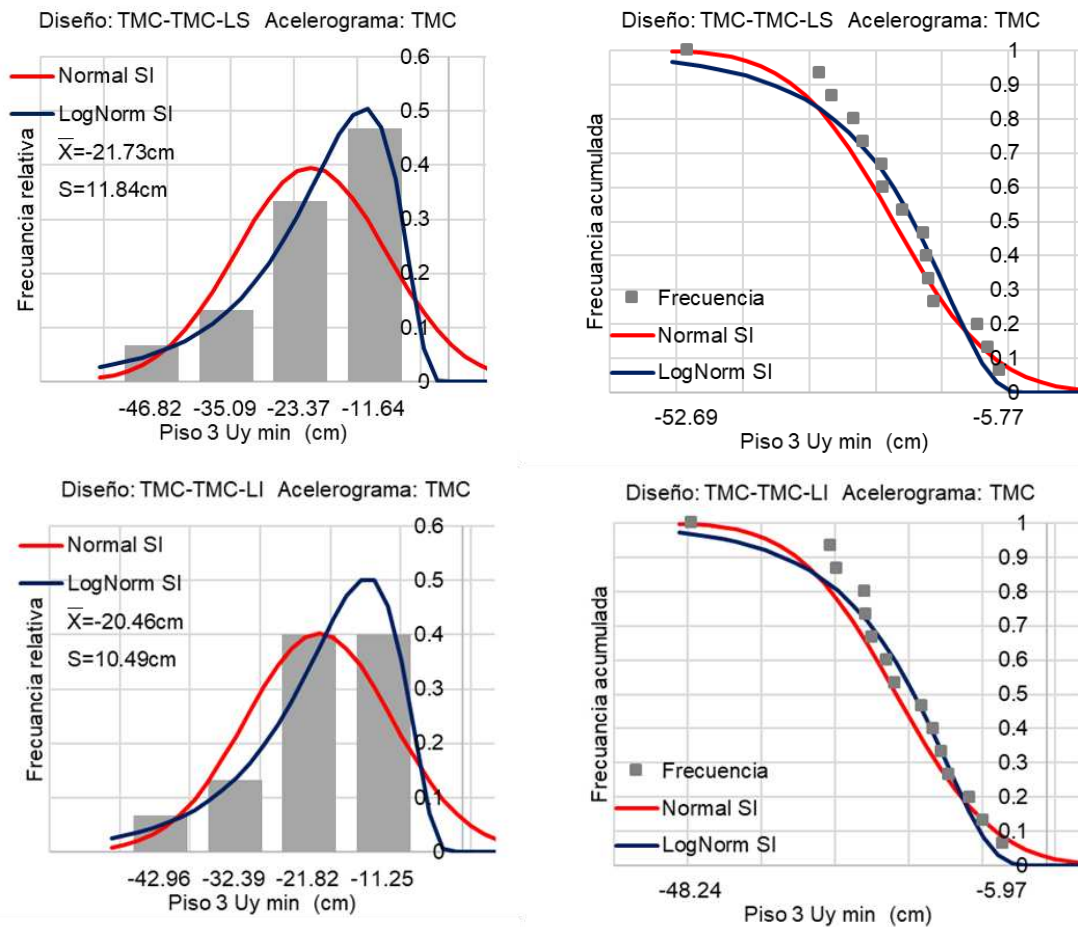


Figura 6: Desplazamientos Uy piso 3 - IC-103 ductilidad limitada, R = 2

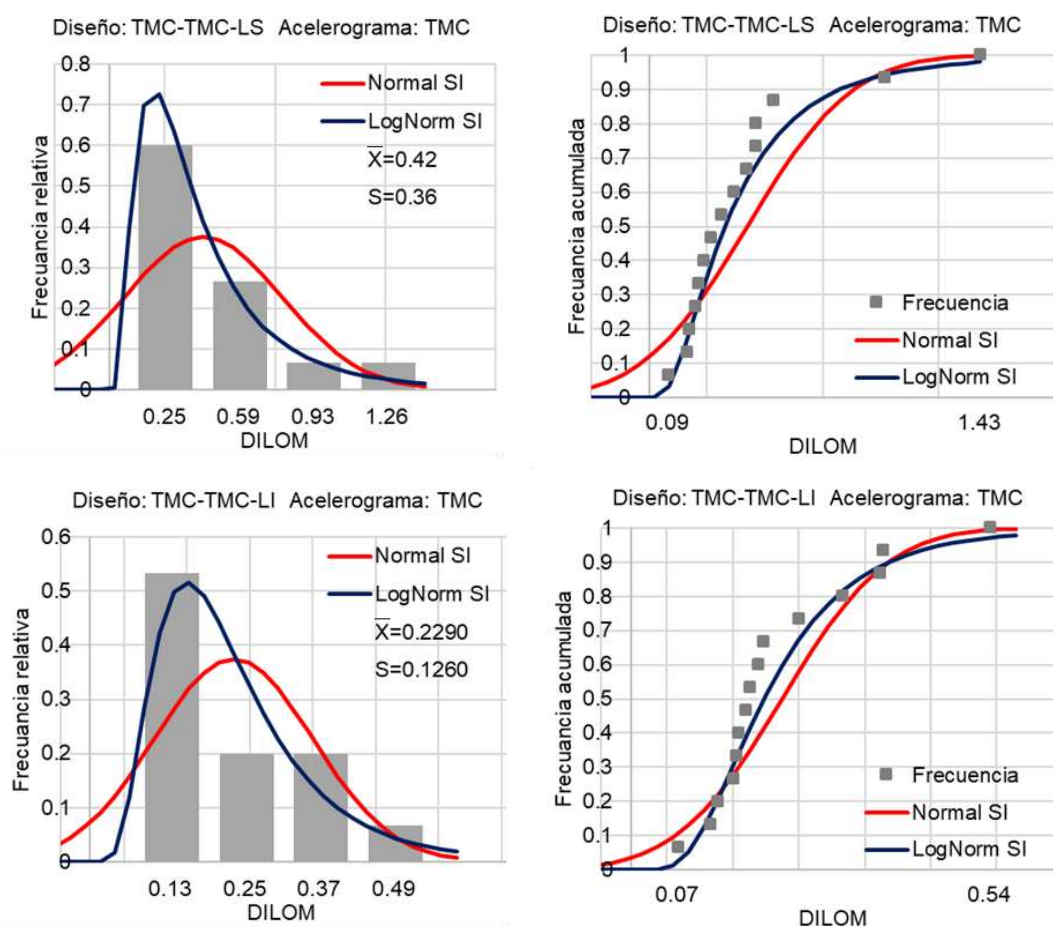


Figura 7: Índice de daño local máximo – CIRSOC 201,  $R = 1.5$

Las figuras 6 y 7 muestran que los resultados numéricos presentados en forma de histogramas pueden ser representados tanto por una función de densidad de probabilidades Normal como Lognormal, ya que ambas satisfacen las pruebas de bondad de ajuste de Chi-Cuadrado y de Kolmogorov- Smirnov. De todas maneras el índice de ajuste es mejor con la función Lognormal, que también se observa visualmente en los gráficos. Se justifica también a partir de los espectros de los acelerogramas, ver Figura 3, donde se observa que la mayoría de los espectros se agrupan cerca del valor medio y un poco inferior, mientras que en menor cantidad tienen valores superiores a la media. Luego el comportamiento no lineal acentúa esa característica. Otros parámetros de respuesta, no mostrados aquí, presentan la misma tendencia.

La Figura 7 muestra el índice de daño local máximo para el diseño con CIRSOC 201 comportamiento esencialmente elástico  $R = 1.5$ . Para el límite superior de los parámetros de aisladores, el valor máximo es 1.43, es decir falla, mientras que para límite inferior el valor máximo es 0.54, no falla y posible de ser reparable. También en este caso, similar a distorsión de piso, en Figuras 4 y 5, se observa la gran influencia de los parámetros de los aisladores. Además, si bien parece conveniente diseñar con  $R=1.5$  y CIRSOC 201, el no confinamiento de los extremos de vigas y columnas genera mayor daño que en algún caso puede conducir a la falla.

En la Tabla 3 se presentan los intervalos de confianza 90% para el valor medio de la muestra analizada, de varios parámetros de respuesta. La Tabla 4 muestra los intervalos de confianza para el desvío estándar.



Parámetro de respuesta	IC-103 ductilidad limitada, R = 2				CIRSOC 201, R = 1.5			
	LS Aisladores		LI Aisladores		LS Aisladores		LI Aisladores	
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup
Aisladores								
d max (cm)	17.90	28.74	19.91	31.59	18.70	30.40	20.76	32.39
Superestruc								
Uy min P3 (cm)	-27.11	-16.34	-25.23	-15.69	-27.21	-15.61	-25.04	-15.53
Dist X P1	0.0063	0.0101	0.0045	0.0066	0.0042	0.0060	0.0028	0.0036
DIES	0.113	0.201	0.075	0.113	0.112	0.232	0.081	0.123
DILOM	0.264	0.505	0.145	0.253	0.261	0.587	0.171	0.286

**Tabla 3:** Intervalos de confianza de valores medios de parámetros de respuesta

Parámetro de respuesta	IC-103 ductilidad limitada, R = 2				CIRSOC 201, R = 1.5			
	LS Aisladores		LI Aisladores		LS Aisladores		LI Aisladores	
	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup	Inf	Sup
Aisladores								
d max (cm)	9.17	17.40	9.88	18.75	9.89	18.78	9.83	18.66
Superestruc								
Uy min P3 (cm)	9.10	17.28	8.07	15.32	9.81	18.63	8.04	15.27
Dist X P1	0.0032	0.0060	0.0017	0.0033	0.0015	0.0029	0.0007	0.0013
DIES	0.074	0.141	0.032	0.061	0.102	0.193	0.036	0.068
DILOM	0.204	0.388	0.091	0.173	0.275	0.523	0.097	0.184

**Tabla 4:** Intervalos de confianza de desvíos estándar de parámetros de respuesta

Los extremos de los intervalos de confianza, aún para probabilidad de 90%, son significativamente amplios, tanto para los valores medios como para los desvíos estándar. Entonces, en análisis de confiabilidad debe tenerse en cuenta esta variabilidad en valores medios y desvíos estándar y no considerarlos como valores “determinísticos”.

Para este ejemplo, los valores de los extremos de los intervalos de confianza son similares para desplazamientos de los aisladores y de la superestructura en los 4 casos analizados: R = 2 con LS y LI, y R = 1.5 con LS y LI. Para distorsión de piso e índices de daño se observan diferencias, con la misma tendencia explicada en la sección 3.3.

## 5 CONCLUSIONES

Se estudió una estructura tridimensional para edificio de hormigón armado de 3 pisos con aislación de base dimensionada con el método estático con dos criterios: (a) IC 103, ductilidad limitada, R = 2; (b) CIRSOC 201, comportamiento esencialmente elástico, R = 1.5. Se realizó análisis dinámico no lineal para el sistema modelado en OpenSees bajo la acción de las 3 componentes simultáneas para 15 acelerogramas registrados compatibles con el espectro de diseño del INPRES-CIRSOC 103 amplificados al terremoto máximo considerado. Se analizó la estadística de varias respuestas obtenidas con límite superior y límite inferior de los parámetros de los aisladores de base. Las principales conclusiones observadas para este ejemplo se resumen a continuación:

- El sistema OpenSees resulta eficiente para el procesamiento numérico de este tipo de estructuras de comportamiento no lineal tanto de los elementos de hormigón armado, como del modelo para los aisladores de base.

- La significativa dispersión observados en los valores de los parámetros de respuesta se deben a la combinación de: (a) Los acelerogramas, que si bien todos fueron escalados inicialmente a  $a_s = 0.35g$ , luego al TMC, pero los valores de sus espectros para los periodos de interés de la estructura aislada presentan ordenadas diferentes; (b) El diseño de la superestructura con IC103 ductilidad limitada y CIRSOC 201 comportamiento esencialmente elástico, que produce diferentes secciones, diferentes rigideces y en consecuencia diferentes desplazamientos, distorsiones de piso e índices de daño; (c) Los límites superior e inferior de los parámetros de los aisladores que transmiten acciones diferentes a la superestructura y modifican el periodo del conjunto y en consecuencia la propia acción sísmica.
- El análisis estadístico permite seleccionar las funciones de densidad de probabilidades más adecuadas para representar la variabilidad de los resultados, y evaluar los intervalos de confianza de sus parámetros, para poder aplicarlos en análisis de confiabilidad.

## REFERENCIAS

- ASCE 7-16. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. *American Society of Civil Engineers*, 2016.
- Christopoulos, C., Filiatrault, A. *Principle of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation*. IUSS Press, 2006.
- CIRSOC 101 Reglamento Argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras. *INTI-CIRSOC*, 2022.
- CIRSOC 201 Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. *INTI-CIRSOC*, 2005.
- Falborski, T., Jankowski, R. Experimental Study on Effectiveness of a Prototype Seismic Isolation System Made of Polymeric Bearings. *Faculty of Civil and Environmental Engineering, Gdansk University of Technology*, pp. 11-12, 2017.
- Hines, W.W., Montgomery, D.C. *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Administración*. Compañía Editorial Continental, México, 1996.
- INPRES-CIRSOC 103 Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes, Partes I y II. *INTI-CIRSOC*, 2021.
- Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. OpenSees command language manual. *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center*, 2005.
- McKenna, F., Scott, M.H., Fenves, G.L. Nonlinear finite-element analysis software architecture using object composition, *Journal of Computing in Civil Engineering* 24: 95-107, 2010.
- Möller, O., Ascheri, J.P., Lucero, G. Análisis dinámico no lineal de estructuras de edificios con aislación de base. *Mecánica Computacional Vol. XXXIX*, pág. 593-602, OCSID 7267, AMCA, 2022. <http://cimec.org.ar/~mstorti/MECOM2022/paper-7267.pdf>.
- Naeim, F., Kelly, J.M. *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*. John Wiley & Sons, Inc, 1999.
- Nassani, D.E., Abdulmajeed, M.W. Seismic base isolation in reinforced concrete structures. *International Journal of Research Studies in Science, Engineering and Technology*, Vol.2 (2), pp.1-13, 2015.
- Nikoo, M., Zarfam, P. Determining Confidence for Evaluation of Vulnerability In Reinforced Concrete Frames with Shear Wall. *Journal of Basic and Applied Scientific Research* 2(7) 6605-6614, 2012.
- Open Sees. The Open System for Earthquake Engineering Simulation 3.2.2-x64, *Pacific Earthquake Engineering Research Center University of California, Berkeley*, 2020. <https://opensees.berkeley.edu/>
- PEER: Pacific Earthquake Engineering Research Center. Strong ground motion database, 2019. <https://peer.berkeley.edu/peer-strong-ground-motion-databases>
- Park, Y.J., Ang, A.H-S. Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.111 (ST4), pp.722-739, 1985.
- Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. *An Introduction to Seismic Isolation*. John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- Zhang, C, Ali, A. The advancement of seismic isolation and energy dissipation mechanisms based on friction. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 146, 106746, 2021.