

## EVALUACIÓN NUMÉRICA DEL DESEMPEÑO SÍSMICO CONSIDERANDO INCERTIDUMBRES

Oscar Möller<sup>a</sup>, Ricardo O. Foschi<sup>b</sup>, Juan P. Ascheri<sup>a</sup>, Mauro Poliotti<sup>a</sup>, Pablo L. Sierra<sup>a</sup> y Sergio Grossman<sup>c</sup>

<sup>a</sup>*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)*

<sup>b</sup>*Civil Engineering Department, University of British Columbia, 6250 Applied Sciences Lane, Vancouver, B.C., Canada V6T 1Z4, [rowfa1@civil.ubc.ca](mailto:rowfa1@civil.ubc.ca)*

<sup>c</sup>*Escuela de Ingeniería Civil, Facultad Cs.Ex., Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Riobamba y Berutti, 2000 Rosario, Argentina, [sergiogrossman@fibertel.com.ar](mailto:sergiogrossman@fibertel.com.ar)*

**Palabras Clave:** Diseño sísmico basado en desempeño, Dinámica no lineal, Incertidumbres, Fragilidad.

**Resumen.** En la nueva generación de procedimientos de diseño sísmico basado en el desempeño, los objetivos se expresan como el riesgo aceptable de daños a las personas (damnificados) y daños a la construcción con sus pérdidas económicas, en función de la peligrosidad sísmica. El desempeño se representa en términos que sean significativos para la toma de decisiones, denominadas “variables de impacto”, como por ejemplo: damnificados (heridos y muertos), costo de reparación o costo de reemplazo, tiempo de reparación, riesgo de la seguridad de ocupación del edificio luego del sismo, etc. Se implementa numéricamente en este trabajo una metodología de evaluación basada en tiempo, considerando incertidumbres tanto en la acción sísmica (peligrosidad sísmica del sitio) como en la capacidad de los componentes del edificio (curvas de fragilidad). Se obtienen curvas de probabilidad de excedencia anual de costos de reparación + costos sociales, que permiten tomar decisiones sobre la aceptabilidad de una estructura existente o un proyecto nuevo, y también comparar diferentes soluciones estructurales. Ejemplos numéricos de aplicación muestran la coherencia y utilidad del proceso implementado.

## 1 INTRODUCCIÓN

La metodología de diseño sísmico basado en el desempeño comenzó a desarrollarse a mitad de los 90' con objetivos múltiples de alcanzar diferentes grados de desempeño para diferentes niveles de terremotos de diseño (SEAOC Vision 2000, 1995; FEMA 273, 1997; FEMA 356, 2000; ASCE 41-06, 2007). Los grados de desempeño se expresaban como Completamente operacional, Operacional, Seguridad de vidas y Límite de colapso, función de rangos aceptables de demanda de resistencia y deformación sobre componentes estructurales y no estructurales, con relación implícita sobre niveles de daños. Los niveles de terremotos de diseño se definen en función de la probabilidad de excedencia en un número de años y su periodo de retorno como: Frecuentes, con probabilidad de 50% de ser excedido en 30 años,  $T = 43$  años; Ocasionales, 50% en 50 años,  $T = 72$  años; Raros, 10% en 50%,  $T = 475$  años; y Muy raros, 5% en 50 años,  $T = 975$  años.

En la nueva generación de procedimientos de diseño sísmico basado en el desempeño, los objetivos se expresan como el riesgo aceptable de daños a las personas (damnificados) y daños a la construcción con sus pérdidas económicas, en función de la peligrosidad sísmica. El desempeño se representa en términos que sean significativos para la toma de decisiones, denominadas “variables de impacto”, como por ejemplo: damnificados (heridos y muertos), costo de reparación o costo de reemplazo, tiempo de reparación, riesgo de la seguridad de ocupación del edificio luego del sismo, etc. (FEMA 349, 2000; FEMA 445, 2006; FEMA P-58, 2012).

Debido a la existencia de incertidumbres, la evaluación del desempeño se realiza en términos probabilísticos utilizando técnicas de simulación numérica de Monte Carlo. Se consideran incertidumbres en la acción sísmica, en los parámetros materiales, en el modelo estructural, en la evaluación de daños, en la cantidad de ocupantes del edificio debido a la hora, día y mes que ocurre el terremoto, en el tipo y cantidad del contenido, y en técnicas y tiempo de reparación. Se obtienen curvas de probabilidad de no excedencia en función de la variable de impacto analizada.

A diferencia de trabajos previos realizados (Möller *et al.* 2015, 2016, 2017) donde el objetivo era la optimización del diseño de estructuras sismorresistentes considerando incertidumbres, la metodología que se presenta en este trabajo es de evaluación del desempeño sísmico de una estructura existente o proyecto nuevo diseñado con cualquier procedimiento. Algunas aplicaciones recientes de estas nuevas metodologías pueden verse en Dhakal and Saha (2017), Snoj and Dolšek (2017), Pereira and Romão (2017), Santa Cruz *et al.* (2017).

Como ejemplos numéricos se presenta la evaluación del desempeño sísmico de un edificio para oficinas de 4 pisos, cuya estructura de pórticos fue optimizada en trabajos previos, y una variante con una estructura de menor rigidez y resistencia para analizar y obtener conclusiones de la sensibilidad del procedimiento.

## 2 METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

La metodología se organiza en los siguientes pasos

a) Modelo de desempeño del edificio: incluye todo los datos necesarios para definir los elementos en riesgo del edificio. Para los elementos estructurales y no estructurales se

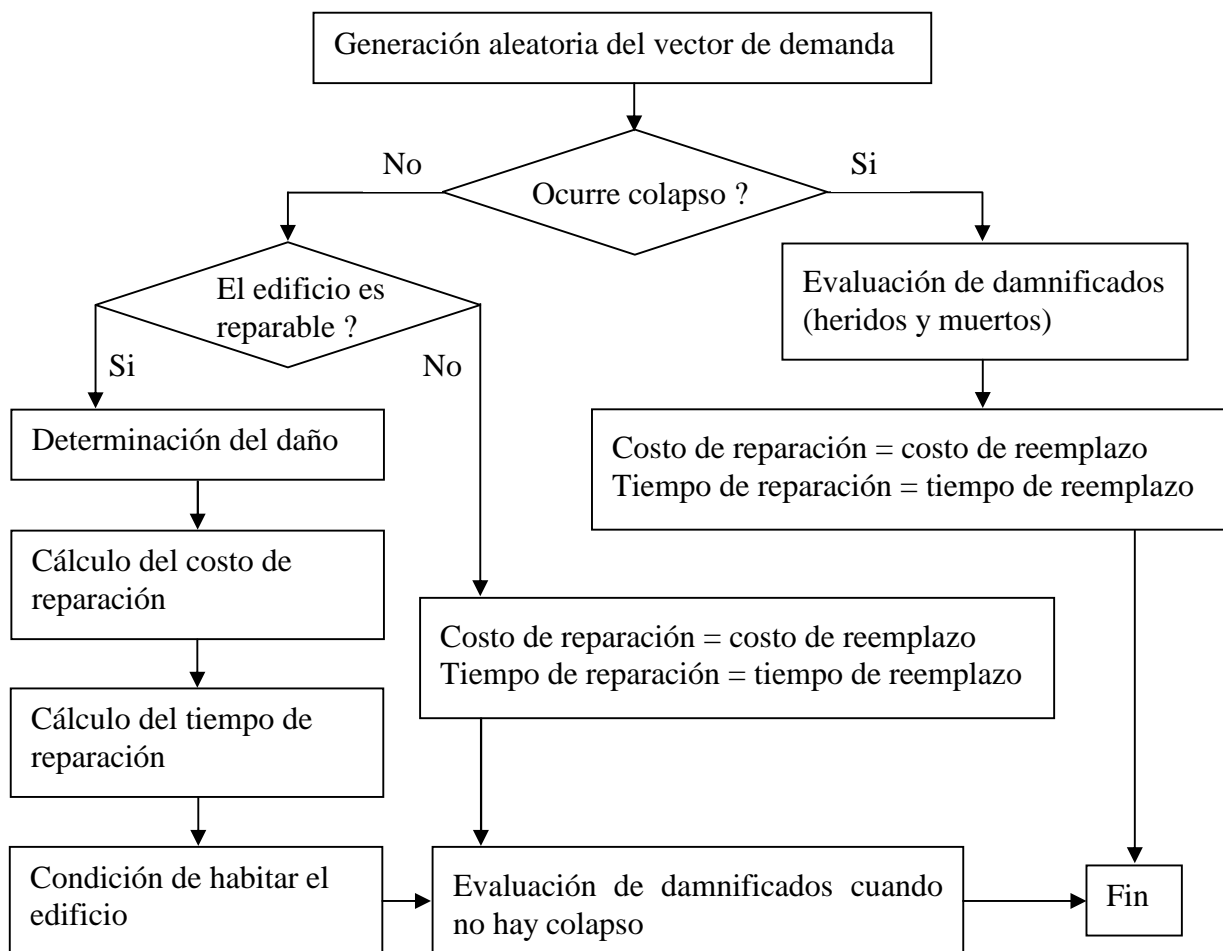
especifica la relación entre parámetro de demanda y el daño con sus consecuencias en costos, denominadas curvas de fragilidad. Para los ocupantes se establece un modelo de la distribución en espacio y tiempo.

b) Definición de la peligrosidad sísmica: se parte de un espectro de diseño y se buscan acelerogramas registrados que acuerden con la forma del espectro en los periodos de interés. Luego son escalados a la aceleración del suelo que resulte de la probabilidad de excedencia anual que se esté analizando. La cantidad de acelerogramas depende del grado de acuerdo con el espectro, con valores típicos entre 7 y 11.

c) Análisis de la respuesta del edificio: con análisis dinámico no lineal se obtienen para cada acelerograma los parámetros de respuesta de interés en la evaluación del desempeño, y se calculan los valores medios y dispersión de cada uno de ellos.

d) Desarrollo de fragilidad a colapso: utilizando análisis dinámico incremental se genera la curva de probabilidad de colapso condicionada al nivel de intensidad sísmica.

e) Cálculo del desempeño: con técnicas de Monte Carlo se generan vectores de parámetros de demanda basada en la estadística del punto c). Para cada realización se evalúa si hay o no colapso y sus consecuencias en damnificados y costos en cada caso. En la Figura 1 se representa el diagrama de flujo para evaluar el desempeño en cada realización.



**Figura 1:** Diagrama de flujo para evaluar el desempeño en cada realización

### 3 PELIGROSIDAD SÍSMICA

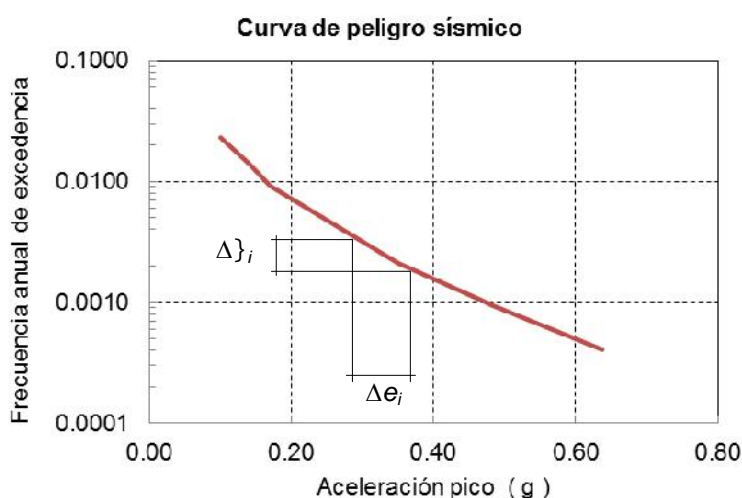
En la definición de la peligrosidad sísmica se considera sólo el movimiento que produce en la estructura. No se tiene en cuenta efectos de liquefacción del suelo, tsunamis, deslizamiento de taludes, etc. El efecto es tridimensional representado con dos componentes horizontales y una vertical. La caracterización se puede realizar mediante espectros de diseño de pseudoaceleración o con acelerogramas para análisis no lineal.

La evaluación del desempeño se puede realizar con las siguientes alternativas: (i) Basada en intensidad: la peligrosidad sísmica se caracteriza con espectros de respuesta definidos por el usuario, en general tomado de los códigos; (ii) Basada en escenarios: mediante espectro de respuesta en aceleración derivado de pares magnitud-distancia, utilizando relaciones de atenuación; (iii) Basada en tiempo: se caracteriza con una serie de curvas de peligro sísmico para probabilidades de excedencia anual seleccionadas, y derivando en cada caso los espectros de respuesta en aceleración.

En este trabajo se aplica el tipo de evaluación basada en tiempo. Para el espectro objetivo se utiliza el espectro de diseño de pseudoaceleración del INPRES-CIRSOC 103 Parte I (2013) para la zona 4 y tipo espectral 1. Se supone que la aceleración efectiva para dicha zona y tipo espectral  $a_s = 0.35g$  tiene una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años, luego, siguiendo el procedimiento de FEMA 356, ver Méndez (2012), se evalúan las aceleraciones para otras probabilidades de excedencia, ver Tabla 1.

Probab de excedencia	T (años)	Frecuencia anual	$a_s$ (g)
50% 30 años	43	0.0233	0.10
50% 50 años	72	0.0139	0.14
50% 75 años	108	0.0093	0.17
10% 50 años	475	0.0021	0.35
5% 50 años	975	0.0010	0.47
7% 75 años	1033	0.0010	0.48
2% 50 años	2475	0.0004	0.64

**Tabla 1:** Probabilidad anual de excedencia de la aceleración del suelo



**Figura 2:** Peligro sísmico compatible con Zona 4 del IC 103

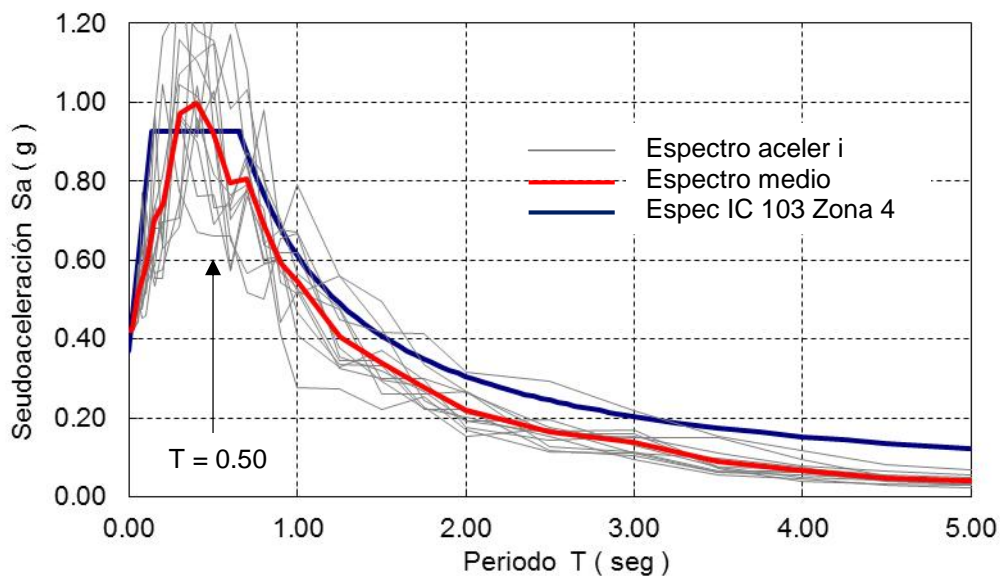
Se asume que la forma del espectro es la misma para las diferentes aceleraciones del suelo  $a_s$  que varía de acuerdo a la probabilidad de excedencia anual. La curva de peligro sísmico que relaciona la aceleración del suelo y su probabilidad anual de excedencia se presentan en la Figura 2. Para la evaluación basada en tiempo, la intensidad del terremoto se divide en intervalos  $\Delta e_i$ . A cada intervalo le corresponde una probabilidad  $\Delta_j$  que se utiliza luego para ponderar los resultados obtenidos en cada valor de intensidad. La discretización numérica utilizada en este trabajo se presenta en la Tabla 2.

Nº	as inf (g)	as sup (g)	as med = ei (g)	Prob exced as inf	Prob exced as sup	Prob exced as med	Prob anual de ocurren
1	0.1	0.19	0.145	0.022878	0.0077895	0.012612	0.0150885
2	0.19	0.28	0.235	0.0077895	0.0035019	0.0051109	0.0042876
3	0.28	0.37	0.325	0.0035019	0.0019439	0.0024898	0.001558
4	0.37	0.46	0.415	0.0019439	0.0011359	0.0013995	0.000808
5	0.46	0.55	0.505	0.0011359	0.00066584	0.00084395	0.00047006
6	0.55	0.64	0.595	0.00066584	0.00043896	0.00053454	0.00022688

**Tabla 2:** Discretización de la curva de peligro sísmico

Para el análisis no lineal de la estructura se debe seleccionar un conjunto de acelerogramas cuyas formas de los espectros de respuesta se aproximen al espectro objetivo para cada intervalo de la discretización de la curva de peligro sísmico. Luego se escalan para que coincidan en la frecuencia fundamental de vibración de la estructura.

Si el acuerdo entre el espectro de los acelerogramas y el objetivo es bueno, se recomienda (FEMA P-58) utilizar 7 acelerogramas. Si el acuerdo es pobre, hay que utilizar al menos 11 acelerogramas. En este trabajo se utilizaron 12 acelerogramas generados artificialmente y escalados para que el espectro medio coincida con  $T = 0.50$  seg para la estructura optimizada en trabajos previos, y  $T = 0.76$  seg para la estructura con menor rigidez y resistencia. El factor de escala se define para cada intervalo de Tabla 2 en función de  $a_{s\ med}$ . Los resultados se muestran en las Figuras 3 y 4.



**Figura 3:** Espectros de los acelerogramas para  $a_s = 0.35g$  y  $T = 0.50s$

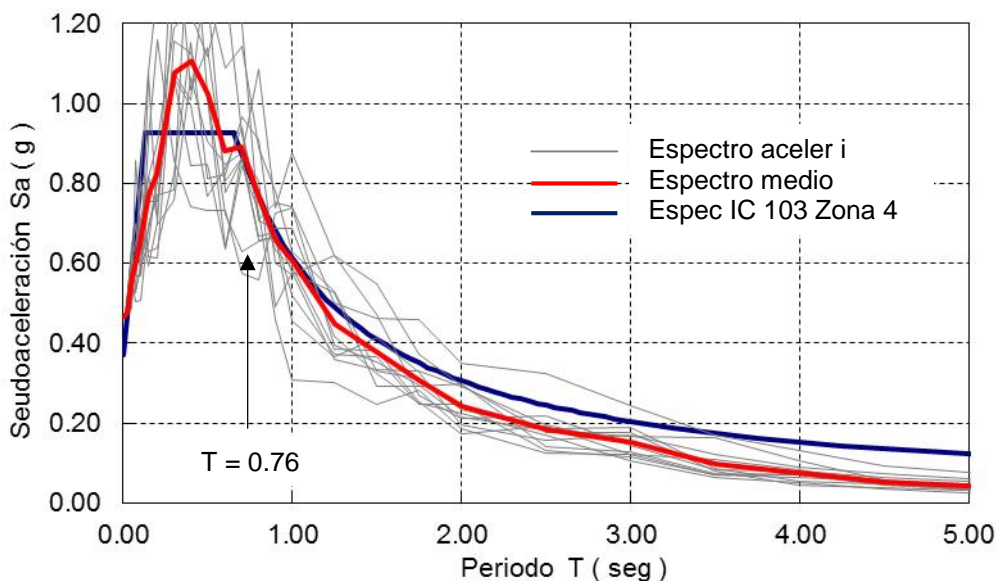


Figura 4: Espectros de los acelerogramas para  $a_s = 0.35g$  y  $T = 0.76s$

#### 4 ANALISIS DE LA RESPUESTA DEL EDIFICIO

Se evalúa un edificio para oficinas de cuatro pisos ubicado en la ciudad de Mendoza, cuya planta se representa en la Figura 5. También se muestra la elevación de los pórticos en la dirección x, que es la dirección analizada para el movimiento sísmico.

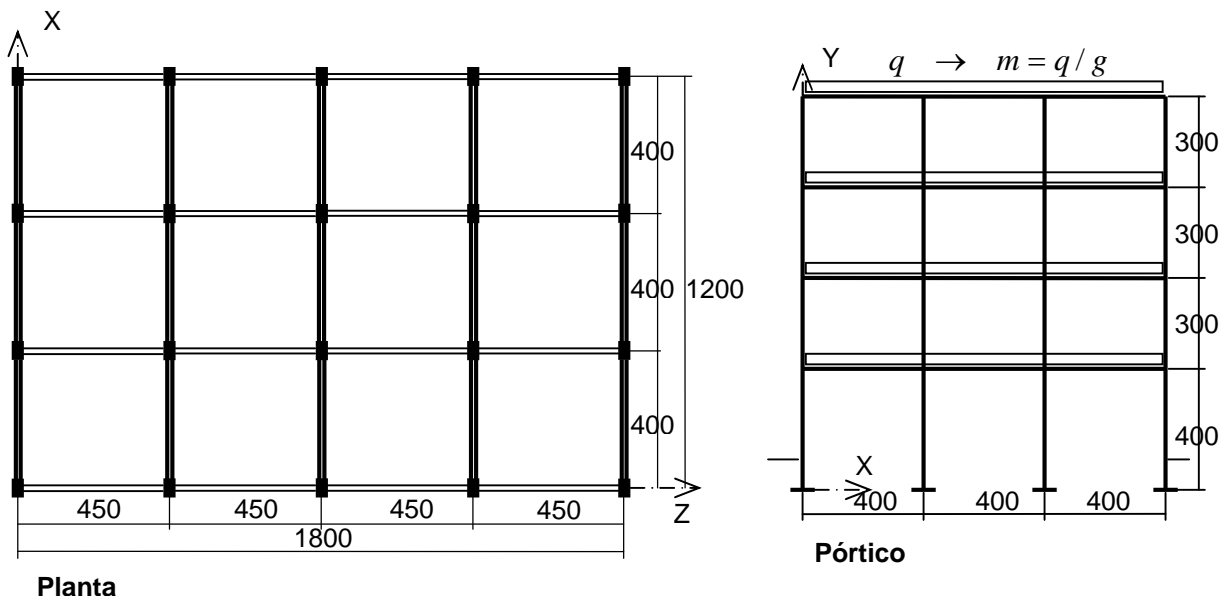


Figura 5: Edificio a evaluar y vista del pórtico resistente genérico

En la Tabla 3 se resumen los valores de las variables de diseño de la estructura optimizada (Möller et al., 2016) para la que resulta un periodo fundamental de vibración  $T = 0.50 \text{ seg}$ , y para una estructura con menor rigidez y resistencia que tiene  $T = 0.76 \text{ seg}$ .

Para cada estructura y para cada valor medio del intervalo de discretización de la aceleración del suelo, ver Tabla 2, con análisis dinámico no lineal de cada uno de los 12 acelerogramas, se obtienen los parámetros de respuesta: (1) UMAX: desplazamiento

horizontal máximo en el último piso; (2) ACEL1: aceleración de piso máximo del primer piso; (3) ACEL2: aceleración de piso máximo del segundo piso; (4) ACEL3: aceleración de piso máximo del tercer piso; (5) DISTM: distorsión máxima de piso; (6) DIES: índice de daño global de la estructura; (7) DILOM: índice de daño local máximo.

Variable	Estr T = 0.50	Estr T = 0.76	Definición
$X(1) = m \text{ (KN s}^2 / \text{cm}^2)$	$3.00 \times 10^{-4}$	$3.00 \times 10^{-4}$	Masa por unidad de longitud en vigas
$X(2) = b_b \text{ (cm)}$	20	20	Ancho de la sección de vigas
$X(3) = h_b \text{ (cm)}$	64.1	50	Altura de la sección de vigas
$X(4) = b_c \text{ (cm)}$	30	30	Ancho de la sección de columnas
$X(5) = h_c \text{ (cm)}$	85.4	60	Altura de la sección de columnas
$X(6) = \dots_b$	0.0119	0.0119	Cuantía de armadura de tramo en vigas
$X(7) = \dots'_b$	0.0104	0.0104	Cuantía de armadura de apoyo en vigas
$X(8) = \dots_c$	0.0184	0.0184	Cuantía de armadura en columnas
$X(9) = f_r / f'_{c0}$	0.10	0.10	Presión de confinamiento

**Tabla 3:** Variables de diseño para las estructuras evaluadas

Sobre los 12 acelerogramas se calculan los valores medios y desvíos estándar de cada parámetro de respuesta, y la matriz de coeficientes de correlación. Como ejemplo se reproduce en la Tabla 4 los resultados para la estructura de  $T = 0.50 \text{ seg}$  e intervalo N°4 de peligro sísmico que corresponde a  $a_s = 0.415 \text{ g}$ .

De esta manera se tiene en cuenta la incertidumbre en el contenido de frecuencias de los acelerogramas sobre la respuesta de la estructura, ya que todos están escalados a la misma aceleración máxima.

## 5 FRAGILIDAD DE LOS COMPONENTES

La fragilidad de los componentes de un edificio representa la distribución estadística de la probabilidad condicional de daño para un valor de demanda dado.

Se definen grupos de fragilidad a elementos con similar potencial de daño y consecuencias de dichos daños. En este trabajo, simplificada, se definen 3 grupos: (a) Elementos estructurales; (b) Elementos no estructurales; (c) Contenidos del edificio referido al mobiliario y el equipamiento.

En forma discreta se definen “estados de daños” para cada grupo de fragilidad. Cada estado de daño está asociado a un parámetro de demanda (respuesta de la estructura) y a un único conjunto de consecuencias en cuanto al costo y tiempo de reparación, potencial de inseguridad para ocupación inmediata luego de un terremoto, y potencial efecto sobre número de lesionados y muertos. Los estados de daños se pueden dar en forma secuencial de menor a mayor daño, pueden ser mutuamente excluyentes, o pueden ser daños simultáneos con probabilidades diferentes donde la suma debe ser el 100%.

En este trabajo se definen 3 estados de daño para cada grupo de fragilidad: bajo, medio y alto. Se asume distribución lognormal para cada estado de daño  $i$ , función de un parámetro de demanda  $D$  y caracterizada por la mediana  $\mu_i$  y el desvío estándar del logaritmo  $S_i$ . Esta

dispersión considera las incertidumbres en las propiedades físicas de los elementos estructurales (rigidez, resistencia, ductilidad), incertidumbres en el daño de elementos no estructurales, e incertidumbres en el vuelco y/o deslizamiento de contenidos.

NSI	UMAX (cm)	ACEL P1 (cm/s <sup>2</sup> )	ACEL P2 (cm/s <sup>2</sup> )	ACEL P3 (cm/s <sup>2</sup> )	DISTM	DIES	DILOM
1	9.03E+00	4.83E+02	8.32E+02	1.16E+03	8.61E-03	1.89E-01	3.53E-01
2	9.25E+00	4.22E+02	8.06E+02	1.36E+03	8.99E-03	1.78E-01	3.37E-01
3	9.74E+00	4.94E+02	7.39E+02	1.01E+03	9.47E-03	2.28E-01	3.93E-01
4	8.24E+00	4.37E+02	7.64E+02	1.09E+03	7.67E-03	1.48E-01	2.96E-01
5	6.21E+00	3.39E+02	5.90E+02	8.05E+02	5.81E-03	4.56E-02	1.47E-01
6	8.24E+00	4.56E+02	8.80E+02	1.31E+03	7.95E-03	1.50E-01	2.94E-01
7	6.83E+00	3.77E+02	7.32E+02	1.06E+03	6.63E-03	1.17E-01	2.64E-01
8	1.03E+01	4.43E+02	7.83E+02	1.36E+03	1.01E-02	2.09E-01	3.92E-01
9	6.58E+00	3.15E+02	5.88E+02	7.91E+02	6.23E-03	5.64E-02	1.64E-01
10	6.76E+00	3.51E+02	6.81E+02	9.42E+02	6.31E-03	1.14E-01	2.48E-01
11	6.67E+00	3.28E+02	6.19E+02	8.93E+02	6.20E-03	9.64E-02	2.26E-01
12	9.88E+00	4.22E+02	7.72E+02	1.27E+03	9.34E-03	1.86E-01	3.56E-01
Val medio	8.144E+00	4.055E+02	7.322E+02	1.088E+03	7.780E-03	1.432E-01	2.890E-01
Des están	1.487E+00	6.156E+01	9.480E+01	2.063E+02	1.519E-03	5.854E-02	8.216E-02
Coef de correlación	1	0.8382	0.7190	0.8007	0.9964	0.9437	0.9437
	0.8382	1	0.8496	0.6972	0.8367	0.9005	0.8792
	0.7190	0.8496	1	0.8988	0.7222	0.7705	0.7796
	0.8007	0.6972	0.8988	1	0.8098	0.7593	0.7880
	0.9964	0.8367	0.7222	0.8098	1	0.9441	0.9447
	0.9437	0.9005	0.7705	0.7593	0.9441	1	0.9960
	0.9437	0.8792	0.7796	0.7880	0.9447	0.9960	1

**Tabla 4:** Resultados para  $T = 0.50$  seg e intervalo N°4 de peligro sísmico  $a_s = 0.415$  g

La probabilidad condicional que el componente llegue al estado de daño  $i$  como función del parámetro de demanda  $D$ , y siendo  $\Phi$  la función de distribución normal estándar, resulta

$$F_i(D) = \Phi \left[ \frac{\ln(D/\mu_i)}{S_i} \right] \quad (1)$$

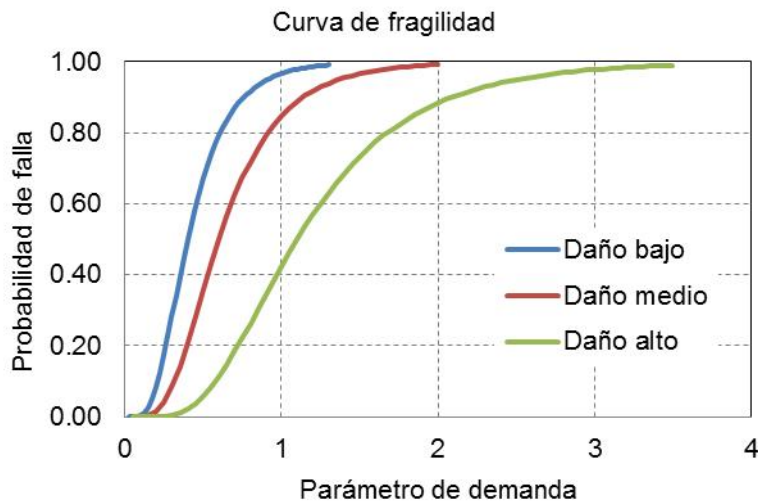
Para estados de daño secuenciales, la probabilidad que el componente tenga estado de daño  $i$ , se calcula con

$$\Pr[i | D] = F_i(D) - F_{i+1}(D) \quad (2)$$

En la Figura 6 se muestran curvas de fragilidad genéricas para 3 estados de daño definidos con  $i = 1$  : daño bajo,  $i = 2$  : daño medio,  $i = 3$  : daño alto, y en la Tabla 5 se presentan los parámetros de demanda para cada grupo de fragilidad y los valores de mediana y desvío estándar logarítmico de cada distribución.

La probabilidad de colapso se asocia al estado de daño alto de elementos estructurales.





**Figura 6:** Curvas de fragilidad genéricas para 3 estados de daño

Grupo de fragilidad	Parámetro de demanda	Estado de daño	Mediana $\mu_i$	Desvío estándar $S_i$
Elementos estructurales	DIES	Bajo	0.10	0.35
		Medio	0.40	0.35
		Alto	0.80	0.35
Elementos no estructurales	DISTM	Bajo	0.005	0.35
		Medio	0.015	0.35
		Alto	0.025	0.35
Contenido	ACELM	Bajo	0.4 g	0.50
		Medio	0.6 g	0.50
		Alto	1.1 g	0.50

**Tabla 5:** Parámetros de las curvas de fragilidad

## 6 CONSECUENCIAS DEL DAÑO: COSTOS

La consecuencia del nivel de daños debido a la fragilidad de los componentes es que origina costos de reparación y costos sociales derivados del nivel de lesiones y cantidad de muertes de personas.

### 6.1 Costos de reparación

Los costos de reparación por daños se consideran función del *costo inicial* de construcción que está compuesto por

a) Estructura resistente: en este ejemplo se compone de las vigas y columnas del edificio. El precio del hormigón, que incluye materiales, encofrado y mano de obra para la colocación, incidencia de gastos generales, beneficios e IVA (1.45), se estima en  $CUH = 845 \text{ USD}/m^3$ . Para el acero de la armadura de refuerzo, incluyendo material y mano de obra para la colocación, se estima en  $CUA = 3.38 \text{ USD}/Kg$ . El volumen de hormigón y el peso de la armadura son función de los parámetros de diseño, resultando

$$C_{01}(\mathbf{x}_d) = [V_{viga}(\mathbf{x}_d) + V_{col}(\mathbf{x}_d)] CUH + [P_{s,viga}(\mathbf{x}_d) + P_{s,col}(\mathbf{x}_d)] CUA \quad (3)$$

En función de los valores de la Tabla 3 resulta  $C_{01} = 186475 \text{ USD}$  para la estructura con  $T = 0.50 \text{ seg}$ , y  $C_{01} = 138285 \text{ USD}$  para la estructura con  $T = 0.76 \text{ seg}$ .

b) Elementos de control de vibraciones: no hay elementos de aislación de base ni disipadores de energía, luego  $C_{02} = 0$

c) Otros elementos estructurales: losas de pisos y fundación. En función del costo por  $m^2$  del edificio ( $681 \text{ USD}/m^2$ ), de los porcentajes habituales de incidencia de estos componentes (28% la estructura y dentro de ella el 40% las losas y el 30% la fundación), de los porcentajes de gastos generales, beneficios e IVA (1.45), se obtiene el siguiente precio global

$$C_{03} = 0.28 (0.40 + 0.305) 681 \text{USD}/m^2 1.45 864m^2 = 168462 \text{USD} \quad (4)$$

d) Elementos no estructurales: incluye el costo de contrapisos, pisos, mampostería, aberturas, instalaciones, etc. El porcentaje de incidencia es de  $1 - 28\%$  de la estructura, resultando el siguiente precio global

$$C_{04} = (1 - 0.28) 681 \text{USD}/m^2 1.45 864m^2 = 614185 \text{USD} \quad (5)$$

e) Contenido: incluye mobiliario y equipamiento. Se considera  $2558 \text{ USD}/\text{puesto}$  de trabajo, y que en este edificio de oficinas trabajan 60 personas, luego el precio global es

$$C_{05} = 2558 \text{ USD}/\text{per} 1.45 60 \text{ per} = 222546 \text{USD} \quad (6)$$

En la situación que haya colapso, el costo de reposición del edificio es la suma de todas las componentes de costo inicial multiplicado por un coeficiente 1.20 que tiene en cuenta el retiro de restos y limpieza del terreno.

En la situación que el edificio no colapse cuando ocurre un terremoto, los costos de reparación de cada grupo de fragilidad y cada estado de daño, se presentan en la Tabla 6.

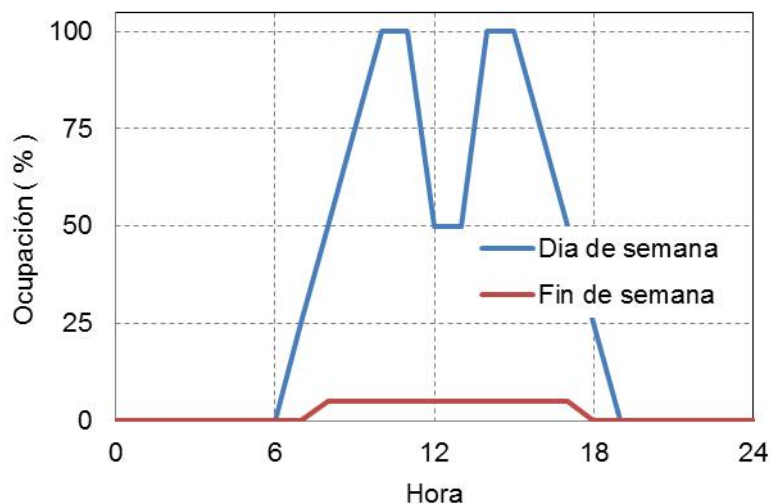
Grupo de fragilidad	Parámetro de demanda	Estado de daño	Costo de reparación
Elementos estructurales	DIES	Bajo	0.15 $C_{01}$
		Medio	0.60 $C_{01}$
		Alto	0.90 $C_{01}$
Elementos no estructurales	DISTM	Bajo	0.10 $C_{04}$
		Medio	0.40 $C_{04}$
		Alto	0.90 $C_{04}$
Contenido	ACELM	Bajo	0.20 $C_{05}$
		Medio	0.50 $C_{05}$
		Alto	0.90 $C_{05}$

**Tabla 6:** Datos para costos de reparación

## 6.2 Costos sociales

A los fines del presente estudio, sólo se tendrán en cuenta los costos directos que debe afrontar el sector social sobre el cual el sismo impactó de manera directa, despreciando en este

caso los costos indirectos. Se consideran 3 escenarios para el análisis de costos, y se tiene en cuenta el porcentaje de personas, sobre el total de ocupación, que están en el edificio en el momento de ocurrir el terremoto PPER, cuyo modelo se presenta en la Figura 7



**Figura 7:** Modelo de ocupación del edificio de oficinas función de la hora y día de la semana

a) **Escenario 1. Índice de destrucción bajo:** cuantificado con  $DIES = 0.10$ . La acción sísmica es lo suficientemente intensa para provocar algunos daños materiales pero sin afectación física a las personas. Se incluye:

Costo de reinserción laboral (CRL): Se considera que el 70% de las personas que están en el edificio requiere un tratamiento profesional psicológico por un período de 3 meses con un mínimo de una sesión semanal, mientras que el 30% restante lo requerirá por 5 meses con igual frecuencia. Resulta  $C_{RL} = PPER/100 \times 28390 \text{ USD}$ .

Costo de evaluación de daños (CED): Se considera que la evaluación de daños del edificio la realizan 2 profesionales durante 5 días hábiles. Resulta  $C_{ED} = 8660 \text{ USD}$ .

Costo de alquiler temporario (CAT): Durante el periodo de evaluación y rehabilitación edilicia las empresas no podrán utilizar sus instalaciones, luego será necesario disponer de oficinas en alquiler durante ese período. Teniendo en cuenta que de acuerdo a la magnitud del sismo se tratará de reparaciones menores, el tiempo estimado es de 1 mes. Resulta  $C_{AT} = 13000 \text{ USD}$ .

Costo total para índice de daño bajo:  $28390 \text{ PPER}/100 + 21660 \text{ USD}$ .

b) **Escenario 2. Índice de destrucción medio:** cuantificado con  $DIES = 0.40$ . La hipótesis de este escenario es que no se producirán muertes, pero se considera que un 70% de las personas que están en el edificio tendrán lesiones importantes que requerirán un tratamiento psicológico más prolongado y además deberán ser tratados clínicamente. El 30% restante sufrirían daños leves. Se incluye:

Costo de reinserción laboral (CRL): Se considera que el 70% de las personas requiere un tratamiento profesional psicológico prolongado por un período de 9 meses con un mínimo de una sesión semanal, mientras que el 30% restante lo requerirá por 6 meses con igual frecuencia. Resulta  $C_{RL} = PPER/100 \times 63880 \text{ USD}$ .

Costo de tratamiento médico (CTM): Bajo la misma hipótesis, un 70% de las víctimas graves requerirán tratamiento médico y medicamentos por un período de 9 meses, mientras que el 30% restante de víctimas tendrán lesiones leves requiriendo un tratamiento médico durante 6 meses. Resulta  $C_{TM} = PPER/100 \times 123700 \text{ USD}$ .

Costo de rehabilitación de víctimas (CRV): Se considera que el 70% de las víctimas graves deberán someterse a un programa de 36 sesiones de rehabilitación a lo largo de los 9 meses de convalecencia, mientras que el 30% correspondiente a las víctimas leves tendrán 24 sesiones de rehabilitación. Resulta  $C_{RV} = PPER/100 \times 155140 \text{ USD}$ .

Costo de evaluación de daños (CED): Se consideran 4 profesionales especialistas trabajando durante 7 días, utilizando equipamientos de medición y auscultación para finalmente realizar ensayos destructivos y no destructivos en un laboratorio especializado. Resulta  $C_{ED} = 35530 \text{ USD}$ .

Costo de alquiler temporario (CAT): Al igual que en el escenario 1 será necesario considerar el alquiler de las oficinas donde deberán mudarse las empresas durante el período de auscultación del edificio y las reparaciones del mismo, que se estima en 6 meses. Resulta  $C_{AT} = 78000 \text{ USD}$ .

Costo total para índice de daño medio:  $342720 \text{ PPER}/100 + 113530 \text{ USD}$ .

c) **Escenario 3. Índice de destrucción alto:** cuantificado con  $DIES = 0.80$ . En un escenario con un alto índice de destrucción, donde los costos sociales se incrementan notablemente, tienen un gran peso las hipótesis que se consideren para el análisis.

Para la situación de no colapso se considera que un 25% de las personas que están en el edificio mueren, un 50% son víctimas de lesiones severas que requerirán un tratamiento prolongado por 12 meses en promedio, y el 25% restante sufrirían lesiones de menor gravedad que les demandarán, en promedio, 9 meses de cuidados médicos. Se incluye:

Costo de reinserción laboral (CRL): El hecho que el 25% de las personas que se encuentran en el edificio mueren, significa que el otro 75% deberá recibir asistencia para reinsertarse al trabajo. Bajo la hipótesis resulta  $C_{RL} = PPER/100 \times 43770 \text{ USD}$ .

Costo de contención familiar (CCF): Los familiares de las personas fallecidas, y de aquellos que han sufrido lesiones de consideración deberán recibir un apoyo profesional que los ayude a entender la situación y a resignarse ante un hecho de tamaño significación. Para el caso de familiares de fallecidos, se consideran 3 familiares con 48 sesiones en promedio, mientras que para los gravemente heridos se considera solo un familiar por el mismo período en promedio. Resulta  $C_{CF} = PPER/100 \times 87542 \text{ USD}$ .

Costo de tratamiento médico (CTM): Corresponde a los gastos en medicamentos y honorarios profesionales de aquellas personas que quedaron con vida, conforme a los valores enunciados para el Escenario 2. Resulta  $C_{TM} = PPER/100 \times 101460 \text{ USD}$ .

Costo de rehabilitación de víctimas (CRV): Se considera que el 50% de las víctimas graves deberán someterse a un programa de 48 sesiones de rehabilitación a lo largo de los 12 meses de convalecencia, mientras que el 25% correspondiente a las víctimas leves tendrán 36 sesiones de rehabilitación. Resulta  $C_{RV} = PPER/100 \times 151857 \text{ USD}$ .

Costo de indemnización por muerte (CIM): Considerando que el edificio de este ejemplo está destinado a oficinas de empresas, se estima un salario medio mensual más un 25% correspondiente a premios, aguinaldo, vacaciones, cargas sociales, etc., y que la antigüedad promedio es de 15 años La indemnización corresponde a un 50% de la normal, debido a que la muerte se produce por causas fortuitas. Resulta  $C_{IM} = PPER/100 \times 330075 \text{ USD}$ .

Costo de seguros de vida individuales (CSV): Debido a que muchas entidades crediticias tales como bancos, tarjetas de créditos, etc., otorgan un seguro de vida obligatorio a sus asociados, se considera en este análisis que el 75% de las víctimas fatales cuentan con tal seguro. Resulta  $C_{SV} = PPER/100 \times 211250 \text{ USD}$ .

Costo de evaluación de daños (CED): Se consideran 6 profesionales especialistas trabajando durante 7 días, utilizando equipamientos de medición y auscultación para

finalmente realizar ensayos destructivos y no destructivos en un laboratorio especializado. Resulta  $C_{ED} = 49400 \text{ USD}$ .

Costo de alquiler temporario (CAT): Al igual que en los escenarios 1 y 2 será necesario considerar el alquiler de las oficinas donde deberán mudarse las empresas durante el período de auscultación del edificio y las reparaciones del mismo, que se estima en 12 meses. Resulta  $C_{AT} = 156000 \text{ USD}$ .

Costo total para índice de daño alto, sin colapso:  $947839 \text{ PPER}/100 + 205400 \text{ USD}$ .

Para la situación de colapso se supone que el 80% de las personas que se encuentran en el edificio mueren y el 20% sufre heridas graves. Siguiendo el mismo esquema anterior se obtiene un costo social para colapso:  $2117683 \text{ PPER}/100 + 234000 \text{ USD}$ .

## 7 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO : RESULTADOS NUMÉRICOS

Se realiza una evaluación basada en tiempo como se explicó en la sección 3, que significa obtener una curva de probabilidad de excedencia anual de costo de reparación + social para cada intervalo en que se discretizó la peligrosidad sísmica, ver Tabla 2.

Para cada intervalo se generan aleatoriamente  $R = 1000$  vectores de demanda (parámetros de respuesta) a partir de la estadística obtenida del análisis estructural con los 12 acelerogramas, ver Tabla 4 para un caso analizado.

El procedimiento de generación de un vector de demanda (realización) se resume a continuación:

Se comienza por generar una muestra de variables aleatorias  $\mathbf{U}$ ,  $\mathbf{u} = (u_1, u_2, \dots, u_N)$  con distribución uniforme entre 0 y 1, con un adecuado “seudo” generador. En este trabajo  $N = 7$  parámetros de respuesta o demanda. Luego se transforman a variables normales estándar no correlacionadas  $\mathbf{Z}$  con

$$z_i = \Phi^{-1}(u_i) \rightarrow \mathbf{z} = \Phi^{-1}(\mathbf{u}) \quad (7)$$

Se puede encontrar una relación entre los coeficientes de correlación  $\dots_{ij}$  de las variables originales  $\mathbf{X}$ , agrupados en la matriz  $\mathbf{R}$ , y los correspondientes  $\dots_{0,ij}$  de variables normales  $\mathbf{Y}$  con distribución  $N(0, 1)$ , agrupados en la matriz  $\mathbf{R}_0$ . Esta relación se puede obtener mediante un proceso iterativo, o por fórmulas semiempíricas deducidas por Der Kiureghian y Liu (1986) y que son utilizadas en este caso.

Se transforman las variables  $\mathbf{Z}$  a las variables  $\mathbf{Y}$  con

$$\mathbf{R}_0 = \mathbf{L} \mathbf{L}^T \rightarrow \mathbf{y} = \mathbf{L} \mathbf{z} \quad (8)$$

Siendo  $\mathbf{Y}$  variables normales estándar correlacionadas equivalentes a las variables  $\mathbf{X}$  que se quieren generar, igualando las funciones de distribución de probabilidades, finalmente se obtiene

$$F_{X_i}(x_i) = \Phi(y_i) \rightarrow x_i = F_{X_i}^{-1}[\Phi(y_i)] \quad (9)$$

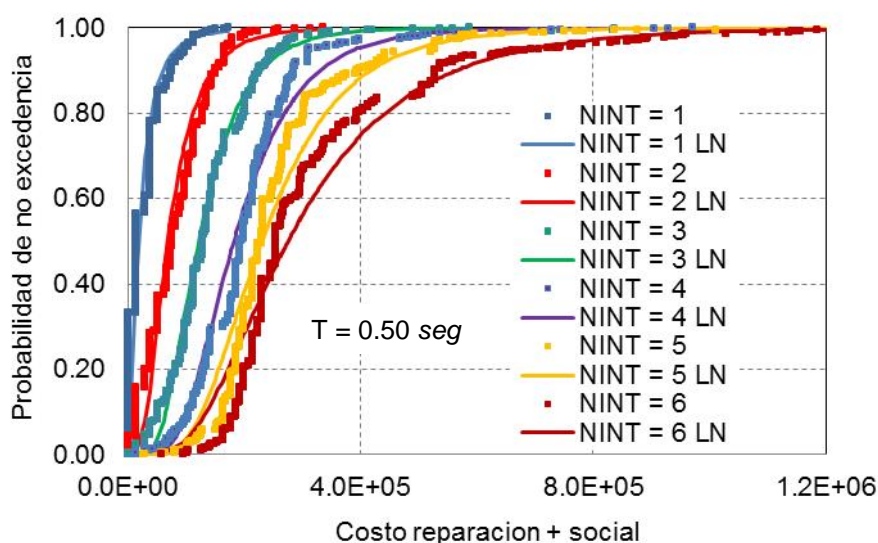
$$\mathbf{x} = F_{\mathbf{X}}^{-1}[\Phi(\mathbf{y})]$$

que es una muestra de las variables  $\mathbf{X}$ ,  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ , con distribuciones  $F_{X_i}(x_i)$  y coeficientes de correlación  $\dots_{ij}$ .

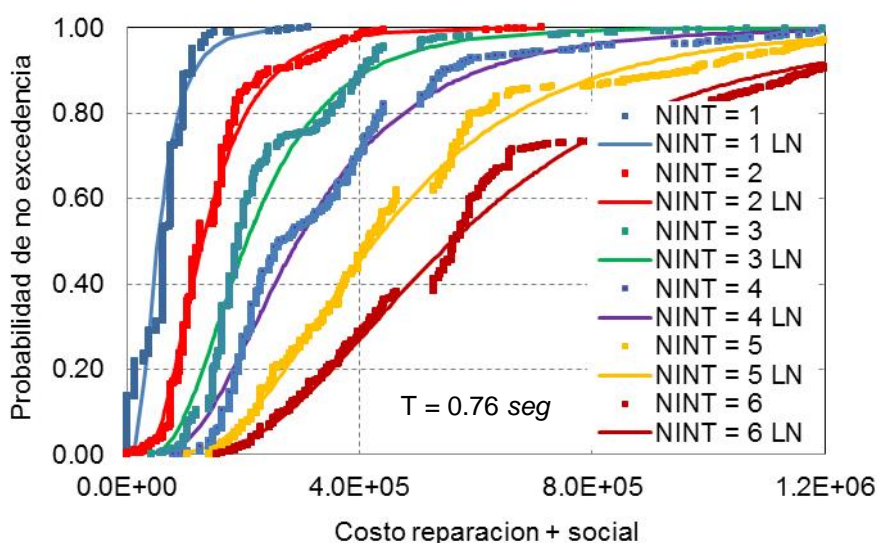
Para cada una de las 1000 realizaciones se sigue el proceso de evaluación del costo descrito en el diagrama de flujo de la Figura 1. Con el parámetro de demanda para cada grupo de fragilidad se define el estado de daño y su correspondiente costo de acuerdo con lo explicado en las secciones 5 y 6.

Para establecer el nivel de daño se genera aleatoriamente un número con distribución uniforme (0,1). Si este número está en el intervalo entre  $F(D)_i$  y  $F(D)_{i+1}$  significa que para esa realización y ese grupo de fragilidad, el nivel de daño será el  $i$ . También se genera aleatoriamente el día y la hora de ocurrencia del terremoto para obtener el porcentaje de personas en el edificio PPER según el modelo de la Figura 7..

Los resultados se ordenan de menor a mayor para construir la curva de probabilidad de no excedencia del costo de reparación + social, como se muestra en la Figuras 8 para la estructura con  $T = 0.50$  seg, y en la Figura 9 para  $T = 0.76$  seg.



**Figura 8:** Costos para cada intervalo de peligrosidad sísmica.  $T = 0.50$  seg.



**Figura 9:** Costos para cada intervalo de peligrosidad sísmica.  $T = 0.76$  seg.

Los resultados ordenados de las realizaciones se indican con ■ y la aproximación con distribución lognormal se representa en línea continua, observándose un muy aceptable acuerdo para todos los casos.

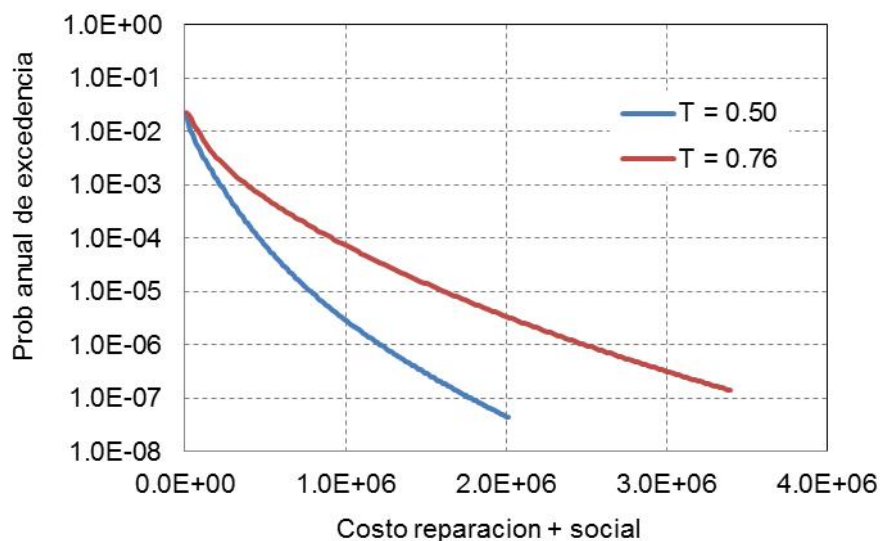
Si se comparan los resultados obtenidos para cada estructura analizada, se observa claramente el mayor costo de reparación + social para la estructura de menor rigidez y resistencia en todos los intervalos de la discretización del peligro sísmico. De otra manera, para un determinado valor de costo, es mayor la probabilidad de no excederlo en la estructura optimizada con  $T = 0.50 \text{ seg}$ . Estos resultados muestran la coherencia del proceso numérico implementado para la evaluación del desempeño.

En la evaluación basada en tiempo, cada curva de probabilidad de no excedencia de costo se pondera con la frecuencia de ocurrencia del intervalo en que se discretizó la peligrosidad sísmica, ver Tabla 2. Llamando  $L$  la variable aleatoria costo,  $l$  un valor particular de dicha variable, y  $e$  la intensidad del terremoto, representado en este trabajo con la aceleración pico del suelo  $a_s$ , resulta

$$\Pr(L > l) = \int \Pr(L > l | E = e) d\{e\} \cong \sum \Pr(L > l | E = e_i) \Delta\{e_i\} \quad (10)$$

Donde la probabilidad  $\Pr(L > l | E = e_i)$  es la curva de costo para cada intervalo, y  $\Delta\{e_i\}$  es la probabilidad de ocurrencia del intervalo representado por  $e_i$ .

Los resultados numéricos obtenidos para cada estructura analizada se presentan en la Figura 10.



**Figura 10:** Costos integrados para toda la curva de peligrosidad sísmica.

Estas curvas de probabilidad anual de excedencia de costo de reparación más costo social permite decidir si una estructura existente o proyecto nuevo es aceptable o no, también permite comparar el desempeño de diferentes soluciones estructurales, teniendo en cuenta también las diferencias en los costos iniciales.

## 8 CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un procedimiento de evaluación del desempeño sísmico de un edificio existente o proyecto nuevo. Dicho desempeño se mide en costo de reparación y costos

sociales cuando ocurre un terremoto. Se tienen en cuenta las incertidumbres presentes en la acción sísmica a través de la curva de peligrosidad sísmica del sitio, y las incertidumbres de la capacidad de los elementos estructurales, no estructurales y contenido mediante las curvas de fragilidad.

Las principales conclusiones a destacar son:

- Es de gran importancia considerar todas las incertidumbres presentes en el proceso de evaluación, para obtener relaciones de probabilidad de excedencia anual de costos de reparación y costos sociales.
- Es significativa la inclusión de costos sociales en la evaluación del desempeño, como se observa en los valores numéricos presentados en la sección 6.2.
- La representación de los resultados de las realizaciones mediante distribución lognormal aparece como adecuada para los ejemplos analizados.
- Los resultados obtenidos para las dos estructuras analizadas muestran la coherencia del proceso numérico implementado para la evaluación del desempeño.
- La evaluación basada en tiempo es muy conveniente porque se calcula la curva de probabilidad anual de excedencia de costo de reparación más costo social, la que permite decidir si una estructura existente o proyecto nuevo es aceptable o no, y además permite comparar el desempeño de diferentes soluciones estructurales.

## REFERENCIAS

- ASCE/SEI 41-06. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings. ASCE, 2007.
- Der Kiureghian, A., Liu, P-L. Structural reliability under incomplete probability information. *Journal of Engineering Mechanics Division*, ASCE, 112(1), 85-104, 1986.
- Dhakar, R.P. and Saha, S.K. Loss optimization seismic design (Iosd): beyond seismic loss assessment. *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE*, ID 163, 2017.
- FEMA 273, NEHRP Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings, Report 273, *Buildings Seismic Safety Council*, 1997.
- FEMA 349, Action plan for performance based seismic design. *Federal Emergency Management Agency*, 2000.
- FEMA 356, Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. *Federal Emergency Management Agency*, 2000.
- FEMA 445, Next-generation Performance-based Seismic design guidelines. *Federal Emergency Management Agency*, 2006.
- FEMA P-58, Seismic performance assessment of buildings. *Federal Emergency Management Agency*, 2012.
- INPRES-CIRSOC 103 Parte 1 Reglamento Argentino para construcciones sismorresistentes, *INTI*, 2013.
- Mendez, J. Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes existentes de hormigón armado, *Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural*, Universidad Nacional de Tucumán, 2012.
- Möller, O., Foschi, R.O., Ascheri, J.P., Rubinstein, M., Grossman, S. Optimization for performance-based design under seismic demands, including social costs, *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(2): 315-328, 2015.
- Möller, O., Foschi, R., Ascheri, J.P., Poliotti, M., Grossman, S. Análisis numérico de sensibilidad en variables de optimización de estructuras sismorresistentes. *Mecánica*



- Computacional*, 34: 1479-1502, 2016.
- Möller, O., Foschi, R., Ascheri, J.P., Poliotti, M., Grossman, S. Probabilistic methods in optimization of structures under earthquake excitation. *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE*, ID 1674, 2017.
- Pereira, N., Romão, X. Towards a practice-oriented strategy to include losses in the seismic assessment of rc frame buildings. *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE*, ID 2233, 2017.
- Santa Cruz, S., Chacon Alvarez, R., Paz Fuentes, I., Niño Lazaro, M. Comparison of two different approaches for the assessment of direct losses through performance-based earthquake engineering. *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE*, ID 4244, 2017.
- SEAOC Vision 2000 Committee. Performance based seismic engineering of buildings. *Structural Engineers Association of California, Sacramento, California, U.S.A.*, 1995.
- Snoj, J., Dolšek, M. Expected economic losses due to earthquakes in the case of traditional and modern masonry buildings Loss optimization seismic design (losd): beyond seismic loss assessment. *Proceedings of 16th World Conference on Earthquake Engineering 16WCEE*, ID 893, 2017.