

## **Potencial Destructivo de Sismos (Segunda Parte)**

**Lía Orosco e Isabel Alfaro Villegas<sup>1</sup>**

*lorosco@ucasal.net*

### **Resumen**

El análisis de estructuras ante la acción sísmica exige que tal sollicitación sea definida en forma adecuada a los fines de obtener resultados confiables. Es común especificar tal carga dinámica por medio de espectros de respuesta o historias de aceleraciones en la base, según el método de cálculo empleado. Tal idealización de la acción debe reflejar las características propias del movimiento en el lugar de emplazamiento de la obra.

Las características dinámicas de la acción definen su potencial de daño. Un primer artículo trató de estos tópicos. En este artículo se hace una revisión de parámetros propuestos para evaluar la capacidad de daño de los sismos.

**Palabras claves:** acelerogramas – potencial de daño - energía

### **1. Introducción**

Hay varios métodos propuestos en la literatura, para cuantificar la severidad, intensidad o potencial de daño del movimiento sísmico. Actualmente los tres términos pretenden medir la misma propiedad del movimiento del suelo: su efecto sobre la estructura del lugar. El único

---

<sup>1</sup> Lía Orosco es Doctora Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos por la Universidad Politécnica de Cataluña, en el área de la Ingeniería Sísmica. Es profesora titular de la cátedra Construcciones de Hormigón Armado, en la Facultad de Ingeniería e Informática de la UCASAL, y también es profesora en la Universidad Nacional de Salta.

Isabel Alfaro Villegas es Ingeniera Civil egresada de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Salta y el presente trabajo formó parte de su labor como becaria BIEA del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Salta, bajo la dirección de la Ing. Orosco.

efecto observado del movimiento del suelo sobre la estructura es el daño permanente por lo que esa medida es usualmente valorada por la mayor o menor correlación que tenga con los daños realmente observados. Esto puede conducir a error, porque el alcance del daño depende de las cualidades en la construcción en el sitio. Así por esta razón, la escala macrosísmica de Intensidad Mercalli Modificada (IMM) no está aceptada como un objeto de medida confiable de potencial de daño, aunque sea muy usada para describir la distribución de daño sobre la región afectada. Una correlación racional entre una medida de intensidad y el daño estructural observado puede ser establecida solo si el sitio afectado tiene edificios uniformemente diseñados en acuerdo con el código de edificación estándar.

Las medidas de intensidad discutidas aquí son evaluadas con respecto a sus habilidades en consideración de la aceleración pico, la duración del movimiento fuerte, duración del pulso de aceleración dominante y contenido de frecuencia del movimiento del suelo.

## 2. Intensidad de Housner

Housner (1952) propuso como medida de la intensidad el área debajo del espectro de pseudo velocidad en el rango de periodo 0.1 a 2.5seg, correspondiente a un amortiguamiento del 5%.

$$I_H = \int_{0.1}^{2.5} S_v dT \quad (1)$$

La velocidad espectral es linealmente proporcional a la aceleración pico. Su mayor desventaja es la incapacidad para considerar el efecto de la duración del movimiento fuerte. La velocidad espectral es insensible a la duración, mientras que la energía entregada a la estructura se incrementa monotónicamente con la duración. Por otro lado, la influencia de la relación  $v/a$ , o la duración del pulso en caso de excitación impulsiva es bien representada por la velocidad espectral (por el principio del momento del impulso lineal de una partícula de masa). El contenido de frecuencia de excitación está representado implícitamente por la distribución espectral de la pseudovelocidad.

## 3. Intensidad de Arias

Arias (1970) introdujo la medida de la intensidad del movimiento del suelo como:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{t_f} a^2(t) dt \tag{2}$$

donde  $t$  es la duración total del registro de aceleración del suelo  $a(t)$ . La intensidad de Arias está estrechamente relacionada con la raíz cuadrática media de la aceleración (RMS) y ésta se corresponde con el área debajo del espectro de energía total absorbido por el sistema de un grado de libertad al final de la excitación del suelo. La  $I_A$  no es sensible al contenido de frecuencia de excitación y los pulsos de aceleración largos en la excitación. La figura 1 muestra la energía acumulada de SJLO y de LHTR (ecuación 2 sin el factor  $\pi/2g$ ) poniéndose en evidencia el carácter impulsivo del segundo.

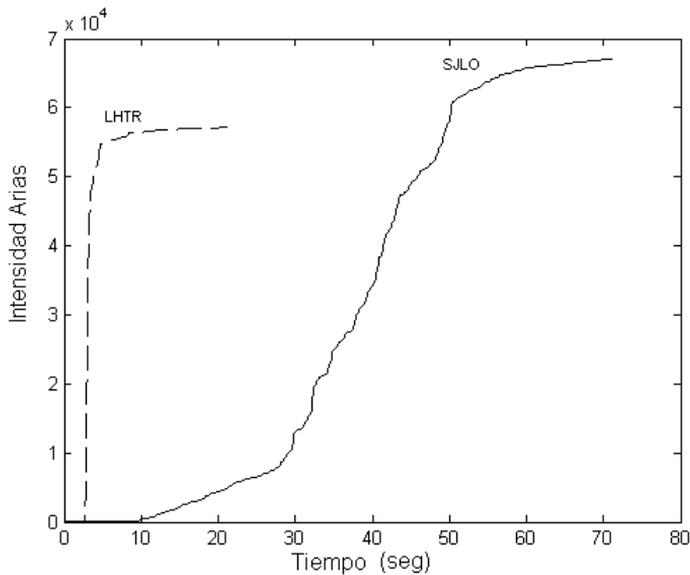


Figura 1: Espectros evolutivos de LHTR y SJLO

#### 4. Potencial destructivo de Araya

Araya y Saragoni (1.985) modificaron la Intensidad de Arias para tener en cuenta el contenido de frecuencia. Definen el potencial destructivo  $P_D$  como:

$$P_D = \frac{I_A}{v_0^2} \quad (3)$$

En esta expresión,  $v_0$  es el número de cruces por unidad de tiempo.

## 5. Consideraciones energéticas en la determinación del potencial de daño

Los parámetros antes explicados tienen implícitas en su definición consideraciones energéticas, ya que están directamente relacionados a la aceleración cuadrática media.

La respuesta estructural dependerá de las características dinámicas del sismo en el sitio donde ésta se funda y las correspondientes a la propia estructura, que actúa como un filtro, amplificando la energía correspondiente a ciertas bandas de frecuencia y no siendo mayormente afectada por otras. Por ello, se han propuesto índices de potencial de daño, considerando explícitamente la respuesta estructural.

A tal fin se debe partir de la ecuación del movimiento de un oscilador simple (S1GDL) sometido a una componente horizontal traslacional del movimiento del suelo, definida por la ecuación (4). Pero en este caso, se considerará el problema en el campo determinista; por ello, se utilizará la variable  $y$  para denominar el movimiento relativo de la masa oscilante  $m$

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + F(y) = -m \cdot a(t) \quad (4)$$

siendo  $m$  la masa del sistema;  $y$  es el desplazamiento relativo de la masa,  $c$  el coeficiente de amortiguamiento,  $F(y)$  la fuerza restauradora del sistema y  $a(t)$  es la aceleración del suelo.

La ecuación (4) es la relación fundamental que controla la respuesta vibracional del sistema. Multiplicándola por  $dy$  (que es igual a  $\dot{y} \cdot dt$ ) e integrando en el intervalo de duración del terremoto  $(0, t_f)$  se obtiene la siguiente ecuación que establece el **balance de energía**:

$$m \int_0^t \ddot{y} \dot{y} dt + c \int_0^t \dot{y}^2 dt + \int_0^t F(y) dy = -m \int_0^t a \dot{y} dt \quad (5)$$

En un oscilador simple elástico la energía de entrada es disipada completamente por amortiguamiento viscoso en el tramo final de la duración del movimiento. Si la estructura incursiona en deformaciones inelásticas, entonces la disipación es en parte debido al amortiguamiento viscoso y en parte a la histéresis del material.

En el caso de osciladores simples lineales, la ecuación anterior puede expresarse como:

$$E_i = E_k + E_s + E_d \quad (6)$$

donde:

$$E_i = m \int_0^t a \dot{y} dt$$

$$E_k(t) = \frac{1}{2} m \dot{y}^2$$

$$E_s(t) = m \omega_n^2 \int_0^{y(t)} y dy \quad (7)$$

$$E_d(t) = 2 \xi m \omega_n \int_0^{y(t)} \dot{y} \cdot dy$$

Entre otros, Fajfar y Fischinger (1990), evaluaron el efecto del comportamiento no lineal en la energía que recibe un sistema de un grado de libertad y concluyeron que la energía de entrada es independiente de la relación de ductilidad y el tipo de modelo histerético con excepción de las estructuras con períodos bajos. Uang y Bertero (1990) también observaron este comportamiento, salvo para los largos y casi armónicos pulsos del sismo de México de 1985. Por otro lado la energía total  $E$  que un terremoto determinado introduce en un edificio es una cantidad muy estable que depende principalmente del periodo fundamental de vibración y de la masa total del mismo y que apenas se ve afectado por la resistencia y por la distribución de masas o rigideces del edificio (Akiyama, 2003).

## Índice de Disipación de Energía

La energía disipada por un oscilador simple durante el tiempo en que es sometido a la acción sísmica, es sensible a los parámetros que describen dinámicamente las características del sismo: duración efectiva, valores picos y contenido frecuencial. En vista de ello Sucuoglu and Nurtug (1995) proponen un índice de la capacidad destructiva de un sismo basado en la energía disipada por un sistema de un grado de libertad, que se expresa como

$$E_I = \frac{1}{T_{\max}} \int_0^{T_{\max}} V_e dT \quad (8)$$

donde:

$$V_e = \sqrt{\frac{2E_d}{m}} \quad (9)$$

es el llamado espectro de energía inducida (Akiyama, 1985) y  $E_d$  está dada en (7) La expresión (8) puede interpretarse como la energía disipada en promedio por la velocidad espectral equivalente del sistema de un grado de libertad sujeto a un movimiento en su base.

En relación a las características dinámicas de los terremotos (detallados en Cuadernos de la Facultad, volumen II), este índice es sensible a la relación  $a/v$ , a valores picos, al contenido espectral, pero no muestra un relación directa con la duración efectiva del sismo. La figura 2 muestra el espectro de energía inducida de LHTR.

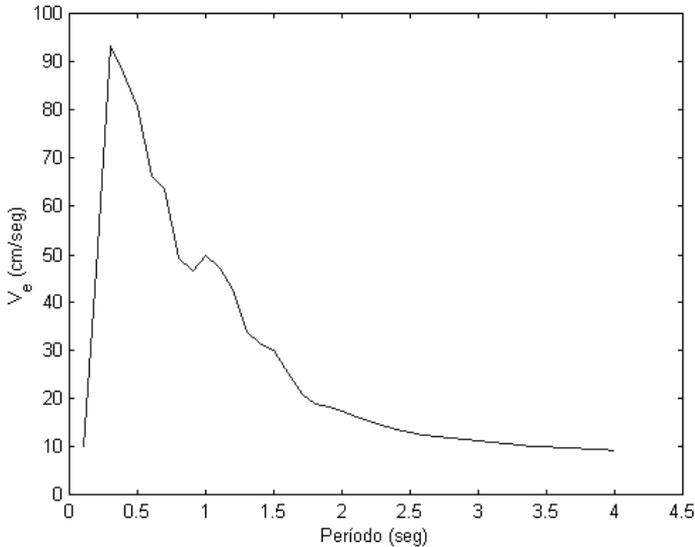


Figura 2: Espectro de energía de LHTR

El uso de la energía que es disipada por una familia de sistemas S1GDL lineales con amortiguamiento viscoso puede tomarse como medida de potencial de daño del movimiento sísmico. Se intentó considerar para medir la intensidad del sismo la disipación de la energía histerética; esto es verdad para cuantificar el daño estructural pero no el potencial de daño del sismo; el potencial de daño es la capacidad de la excitación sísmica de causar un daño, mientras el daño en sí depende fuertemente de las características estructurales. Una excitación sísmica con un potencial de daño dado quizás causa diferentes niveles de daño sobre sistemas diferentes, dependiendo de la capacidad de resistencia de dicho sistema. Se concluye que establecer una relación consistente entre la energía disipada y la relación de ductilidad no es posible sin la consideración de todas las características estructurales que contribuyen a la respuesta de sistemas S1GDL inelásticos.

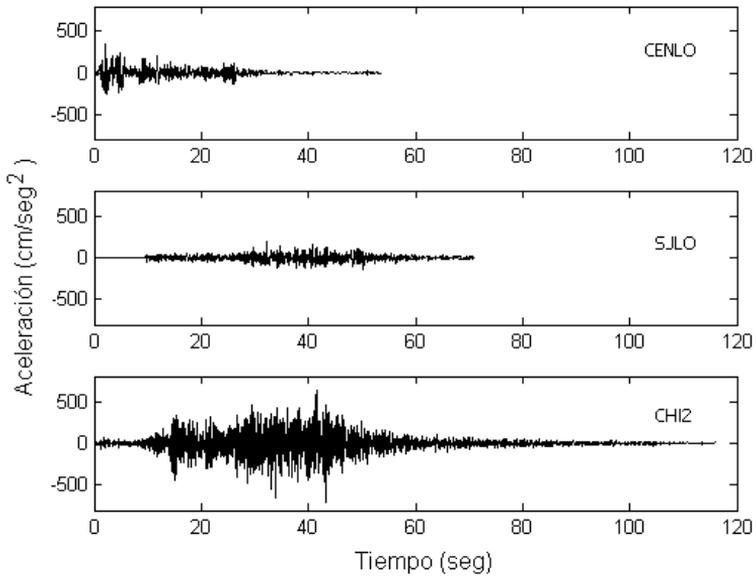


Figura 3: Acelerogramas de sismos intensos

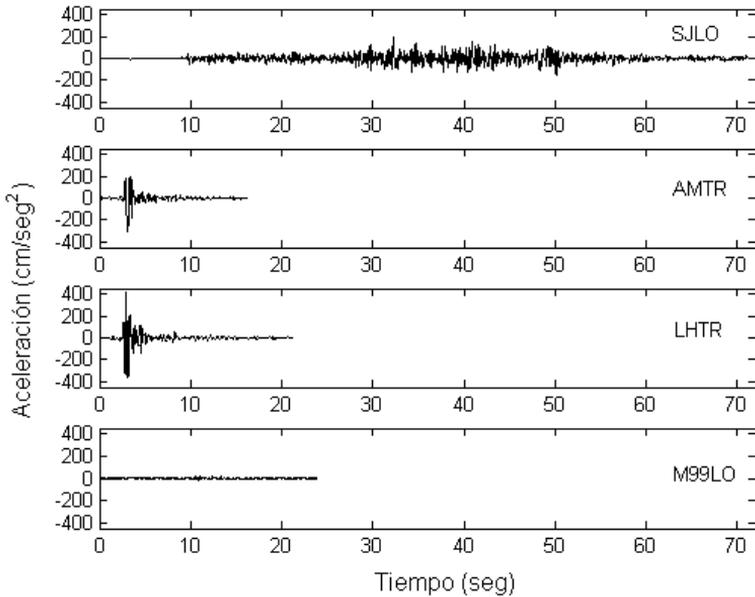


Figura 4: Acelerogramas de varios eventos argentinos

## 6. Registros analizados

Se analiza el potencial destructivo de algunos registros de sismos que se muestran en las figuras 3 y 4; la primera permite comparar al estar dibujados en la misma escala, tres sismos intensos: el famoso sismo El Centro, el acelerograma registrado en San Juan durante Caucete-77 y el registro en LLolleo del sismo de Valparaíso de 1985. La figura 4 permite comparar sismos registrados en Argentina, incluyéndose M99LO, que es el acelerograma registrado en la ciudad de Salta, durante el evento de Tilcara-99. Las características generales de los mismos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Características de sismos analizados

Reg.	Sismo	R	M	Amax	$\delta$	$t_f$	$t_e$
<b>CENLO</b>	Centro 1940	2	6,9	341,70	0,71	53,76	24,38
<b>CHI2</b>	Chile 1985	-----	7,6	698,21	0,18	116,38	46,43
<b>SJLO</b>	Caucete 1977	75	7,4	186,93	0,51	71,24	50,32
<b>AMTR</b>	Mendoza 1985	28,20	5,7	332,13	0,73	16,30	3,60
<b>LHTR</b>	Mendoza 1985	33,10	5,7	408,47	0,66	21,28	4,19
<b>M99LO</b>	Tilcara 1999	227	3,9	18,54	0,76	24	17,08

La primera columna designa el registro (la terminación LO señala que se trata de la componente longitudinal y la terminación TR la transversal); R es la distancia hipocentral, en km; M la magnitud;  $A_{\max}$  el valor pico de la aceleración en  $\text{cm}/\text{seg}^2$ ;  $\delta$  el factor de Vanmarcke;  $t_f$  y  $t_e$  las duraciones total y efectiva respectivamente, en segundos.

Con respecto al potencial de daño, los parámetros analizados fueron calculados para los acelerogramas considerados en este estudio y los resultados se resumen en la Tabla 2; se determinó la intensidad de Housner  $I_H$  (cm), la intensidad de Arias  $I_A$  (cm/seg), el parámetro de Araya  $P_D$  y el índice de Sucuoglu y Nurtug,  $E_I$ , en cm/seg.

Tabla 2: Potencial de daño

Registro	$I_H$	$I_A$	$P_D$	$E_I$
CENLO	135,86	183,28	5,14	85,69
CHI2	196,79	1522,51	13,92	145,17
SJLO	68,22	105,35	1,50	56,63
AMTR	69,01	47,42	0,79	25,75
LHTR	70,26	91,46	2,11	27,71
M99LO	0,46	1,70	0,002	0,993

## 7. Conclusiones

La adopción de parámetros inadecuados o insuficientes para describir la capacidad de producir daños del movimiento del suelo esperado, puede conducir a la selección de terremotos de proyecto no realistas y consecuentemente a evaluaciones poco confiables del riesgo sísmico de las construcciones existentes o a una protección insuficiente de las nuevas construcciones.

Del estudio de los parámetros que miden la intensidad del mismo y su relación con las características dinámicas que definen su mayor o menos potencial de daño, se puede concluir:

1. La **energía disipada** por los sistemas S1GDL lineal y no lineal no tienen diferencia significativamente bajo componentes de excitación sísmica. Por lo tanto, los sistemas elásticos lineales pueden ser utilizados para evaluar la disipación de energía sísmica.
2. La **Intensidad de Arias** y la **Intensidad de Housner** son parámetros usados para determinar la intensidad del sismo. Estos no presentan una buena correlación cuando se examina un conjunto representativo de eventos sísmicos. A veces describen adecuadamente el potencial de daño de ciertos terremotos pero resultan inadecuados en otros. Además entre los parámetros se observan notables diferencias.
3. El **Potencial Destructivo de Araya-Saragoni** es un interesante parámetro descriptivo de la destructividad del movimiento del suelo. Este considera simultáneamente el efecto de la amplitud de las aceleraciones, de la duración del

movimiento del suelo y del contenido frecuencial. Diversos estudios e investigaciones han puesto en evidencia que este parámetro resulta bastante bien correlacionado con los daños observados y con la Intensidades macrosísmicas equivalentes. Este es el parámetro mas completo y el que mejor se ajusta a los daños observados.

4. El espectro de disipación de energía de los sistemas S1GDL pueden ser empleados como una medida efectiva del potencial de daño de los registros sísmicos, porque este considera la contribución de las características del movimiento básico de la respuesta espectral tales como la aceleración pico, la relación de velocidad y aceleración, la duración efectiva y el contenido frecuencial.

## **Bibliografía**

- Akiyama, H., Earthquake resistant limit state design of buildings, University of Tokio Press, Tokio, 1985.
- Akiyama, H; Metodología de diseño sismorresistente de edificios basada en el balance energético, Edit. Reverté, S.A. ISBN 84-291-2012-2. Barcelona, España, 2003.
- Araya, R. and Saragoni, G.R., Earthquake accelerogram destructiveness potential factor, Proc. 8th World Conference on Earthquake Engng, EERI, San Francisco, CA, pp 835 – 842, 1985.
- Arias, A., A measure of earthquake intensity, Seismic Design for Nuclear Plants (R.J. Hansen ed.), MIT Press, Cambridge, MA, pp. 438 – 469, 1970.
- Fajfar, P. and Fischinger, M., A seismic design procedure including energy concept, Proc. 9th European Conference Earthq. Engng, Moscow, Vol 2, pp 312-321, 1990
- Housner, G.W., Spectrum intensities of strong motion earthquakes, Proc. Symp. of earthquake and blast effect on structures, EERI, Los Angeles, CA, pp 835 – 842, 1952.
- Sucuoglu H. and Nurtug A., Earthquake ground motion characteristics and seismic energy dissipation, Earthq. Eng. Struc. Dyn., Vol 24, 1995, pp 1195 – 1213, 1995.

Uang, C.M. and Bertero, V.V., Evaluation of seismic energy in structures  
Earthq. Eng. and Struc. Dyn., Vol 19, pp 77- 90, 1990.