

ISSN 1409-2441

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
Enero/Diciembre 1998 VOLUMEN 8 Nos. 1 y 2



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DAÑO DE SISMOS RECIENTES EN COSTA RICA

Miguel Cruz A.¹

Eduardo Infante H.²

Victor Schmidt D.³

Resumen

En este trabajo se determinó el potencial destructivo de algunos sismos a partir de registros obtenidos en Costa Rica y en otros países, usando el índice de daño de Park y Ang. Se trabajó con estructuras de un grado de libertad definidas para tres períodos fundamentales, tres fracciones de amortiguamiento crítico y seis niveles de resistencia. Las estructuras fueron sometidas a los registros sísmicos. Se utilizaron parámetros sísmicos para correlacionar el daño, los cuales fueron: aceleración pico del terreno, aceleración espectral, energía de entrada por unidad de masa y la Intensidad de Arias. Se logró establecer las correlaciones entre el índice de daño que se provoca en las estructuras y los parámetros sísmicos. Los resultados demostraron que el índice de daño se correlaciona bastante bien con la aceleración espectral y con la energía de entrada. Sin embargo, presenta malas correlaciones con la aceleración pico del suelo y con la Intensidad de Arias. En todos los casos, al aumentar la resistencia las correlaciones mejoraron, además de que los valores de índice de daño disminuyeron. Para todas las estructuras de este análisis, son los registros extranjeros los que producen mayores índices de daño, lo que indica que los registros costarricenses no alcanzan el potencial destructivo de los registros internacionales considerados.

Summary

In this work the potential damage of some earthquakes is evaluated from available records. Costarrican and foreign ones are used to determine the Park and Ang damage index. One degree of freedom structures are used. They were defined with three different vibration periods, three damping ratios and six strengths levels, and later subjected to the earthquake records. Earthquake parameters are used to correlate damage and they are the following: peak ground acceleration, spectral acceleration, input energy per unit of mass, and Arias intensity. Correlations between damage index and earthquake parameters were made. The results show that damage index is well correlated with spectral acceleration and input energy; however, poor correlations are obtained with peak ground acceleration and Arias intensity. In all cases, when strength is increased, the correlations are improved and damage index is reduced. In all the structures considered, the foreign records produce the greatest damage index which shows that Costarrican records are not as destructive as those.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se determinó el potencial destructivo de algunos registros sísmicos obtenidos en Costa Rica y en otros países, a partir de indicadores de daño propuestos para

estructuras.

Para la estimación y comparación de la severidad de distintos registros sísmicos, algunos investigadores han coincidido en la conveniencia de plantear indicadores que permitan cuantificar el daño provocado por un

¹ Escuela de Ing. Civil, Univ. de Costa Rica.

² Laboratorio de Ing. Sísmica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Univ. de Costa Rica.

³ Laboratorio de Ing. Sísmica, Instituto de Investigaciones en Ingeniería, Univ. de Costa Rica

sismo en una estructura. Estos han sido propuestos desde la década pasada y son definidos como **parámetros e índices de daño**. (Park et. al., 1985, pp 722-739; Powell et. al., 1988).

Para modelar la respuesta no lineal de los elementos estructurales, se propuso un diagrama esfuerzo deformación elastoplástico. En este modelo, la ductilidad se limitó a un valor de cinco, de tal manera que $\theta_u = \mu\theta_y$ (θ_u, θ_y rotación última y rotación de cedencia de la sección de un elemento respectivamente). Se utilizó el programa DRAIN - 2D (Kanann et. al., 1976), que permite calcular la respuesta no lineal de los sistemas. Se trabajó con un intervalo de tiempo entre dos datos de aceleración consecutivos igual a 0.02 segundos. No se consideró el efecto P- Δ .

2. ÍNDICES DE DAÑO

Los índices de daño son indicadores del daño estructural que se produce en una estructura con características dinámicas definidas durante las sacudidas sísmicas. Los sismos provocan diferentes niveles de daño en las estructuras y aún más, un mismo sismo puede dañar considerablemente una estructura específica pero no así muchas otras. Esto depende de las características dinámicas del sistema.

Por lo tanto, la evaluación del daño en una estructura por medio de estos índices permite fácilmente cuantificar el efecto destructivo que un mismo registro sísmico provoca en estructuras con características dinámicas distintas, o bien una cuantificación del daño que distintos registros generan en una misma estructura.

A continuación se describe brevemente el índice de daño con el cual se obtuvo buenas correlaciones.

Índice Propuesto por Park y Ang (ID_{PA}).

En el modelo propuesto por Park y Ang (Park et. al., 1985, pp 722-739) se considera que el daño es causado por una combinación de los efectos provocados por la deformación excesiva y por la disipación de energía en el proceso cíclico de carga y descarga (efecto acumulativo del daño). Esto se expresa matemáticamente como la suma de una razón de deformaciones y una razón de energías, esta última afectada por un factor β que toma en cuenta el efecto de la aplicación cíclica de las cargas, sobre el deterioro de la resistencia y es dependiente de las características estructurales presentes en cada caso, por lo que en su determinación no se realizaron mayores cálculos. Mas bien, en este trabajo se usó un valor único de β igual a 0.2, acorde con lo propuesto por los autores de este índice (Park et. al., 1986, pp 1721-1729).

La ecuación que lo define en términos de rotación es:

$$ID_{PA} = \frac{\theta_m}{\theta_u} + \beta \frac{\int dE_H}{M_y \theta_u} \quad (1)$$

donde:

M_y - momento de cedencia,

E_H - la energía plástica disipada

Park y Ang proponen que si el índice de daño alcanza un valor de 0.8, el elemento estaría colapsado y que si supera 0.4 el elemento es irreparable (Park et. al, 1985, pp 740-757).

3. SISMOS UTILIZADOS Y CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS

De los registros disponibles en Costa Rica se escogieron los correspondientes a los sismos que han provocado recientemente mayores daños en estructuras. Tal es el caso de Piedras Negras (22 / 12 / 90), que causó serios daños

en la ciudad de Alajuela en edificios y viviendas. En este caso se cuenta con registros bastante cercanos al epicentro (Represa de San Miguel, situada a 6 Km del epicentro) y otros más cercanos a la zona de mayores daños (Parque Central de la Ciudad de Alajuela).

No así son los casos de Limón (22 / 04 / 91) y Cóbano (25 / 03 / 90), donde los registros con que se cuenta no fueron obtenidos en sitios cercanos a la zona epicentral, o bien donde se concentraron los mayores daños. La descripción de estos tres sismos y sus efectos se encuentra en EERI, 1992.

En la tabla que contiene la lista de registros sísmicos (ver apéndice tabla 1), se puede observar el registro extranjero del sismo del Valle de San Fernando en Pacoima, es el que presenta mayor valor tipo aceleración pico (PGA). Sin embargo, la duración de su fase fuerte es aproximadamente de 12 segundos y predominan las de frecuencias altas.

De los registros costarricenses, es el de **Piedras Negras** localizado en la presa de San Miguel de Alajuela el que presenta mayor PGA, a excepción del presentado en Cartago (duplicado y triplicado), que corresponden a registros ficticios que intentan reproducir el registro del sismo de Cartago (1910) a partir del sismo de **Piedras Negras** registrado en CTG (estación acelerográfica ubicada en el Parque Central de Cartago).

Con respecto a los períodos predominantes, el registro de México (1985) es el que muestra un valor mayor con un período (T) de 2.1 segundos y es probablemente el que tiene mayor duración cercana a los 60 segundos. Por otro lado, de los registros costarricenses es el de Cóbano (en Puntarenas) el de mayor período predominante, con T=1.8 segundos.

Otro registro que es importante destacar es el de Llolleo, Chile (1985), que tiene una larga duración de la fase fuerte (cercana a

60 segundos) y a la vez valores de aceleración muy altos durante toda esa fase, aproximadamente de 300 cm/s^2 . Así como el predominio de altas frecuencias.

4. PARÁMETROS SÍSMICOS

A continuación se definen brevemente algunos parámetros sísmicos que se relacionan con la destructividad de los registros sísmicos. Estos son:

4.1 Aceleración pico del suelo (PGA). Se define como el valor máximo (absoluto) de aceleración, medido en un acelerograma filtrado. Puede ser expresado en diferentes unidades, pero lo común es que aparezca en GALS (cm/s^2) o en porcentaje de la aceleración de la gravedad.

4.2 Intensidad de Arias (I_A). Se define como la cantidad de energía por unidad de peso disipada por una familia de osciladores de un grado de libertad y amortiguamiento cero, con frecuencias que van desde cero hasta $+\infty$, para un registro dado. Está dada por la ecuación simplificada:

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_e} a_g^2(t) dt \quad (2)$$

donde:

$a_g(t)$ - aceleración del terreno en función del tiempo,

g - aceleración de la gravedad (9.81 m/s^2),

T_e - duración total del registro.

4.3 Aceleración Espectral (S_A). Representa la respuesta máxima de una estructura de un grado de libertad con características dinámicas dadas (masa, amortiguamiento y rigidez) al ser sometida a una historia de

aceleraciones (registro).

4.4 Energía de entrada por unidad de masa (E_i). Se define como el trabajo total que hacen las fuerzas laterales equivalentes causadas por el sismo en una estructura en los desplazamientos relativos de la masa, normalizado por la masa total (Uang et.al, 1990). En este trabajo este parámetro se calculó para estructuras con comportamiento elástico.

Se calcula como:

$$\frac{E_i}{m} = - \int_0^{T_D} a_g(t) du \quad (3)$$

donde:

T_D - duración del evento,

$a_g(t)$ - aceleración del suelo en función del tiempo,

m - masa,

u - desplazamiento relativo de la masa respecto al suelo.

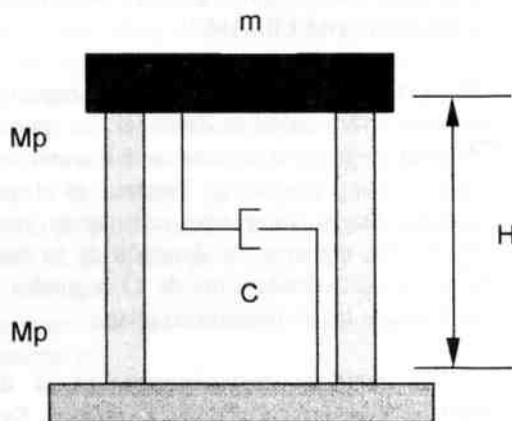
5. MODELOS ESTRUCTURALES Y PROCEDIMIENTO

Se trabajó con estructuras de un grado de libertad con periodos: 0.5, 1.0 y 1.5 segundos, y fracciones de amortiguamiento crítico: 2%, 5% y 10%, tanto para la estimación de los índices de daño como de los parámetros sísmicos.

Para considerar el efecto de la resistencia, se calcularon los niveles de resistencia requeridos para soportar con comportamiento elástico las fuerzas causadas por un sismo con aceleración máxima de 10% de g (R_1), y otro con aceleración máxima de 30% de g (R_3). Se usaron los factores de amplificación dinámica para estructuras tipo 5 del Código Sísmico de Costa Rica, para suelo firme. Con estos

niveles de resistencia, considerados como límites inferior y superior de la misma, se interpolaron linealmente cuatro niveles adicionales igualmente espaciados para obtener un total de seis resistencias.

El siguiente dibujo muestra el modelo de las estructuras utilizadas y la tabla N° 2 (VER APENDICE) presenta los diferentes niveles de resistencia asignados a los extremos de las columnas, según el período fundamental de la estructura.



Dibujo N°1. Esquema de las estructuras utilizadas en el presente estudio

Donde:

M_p - momento nominal de resistencia,

H - altura de las columnas,

C - amortiguador

m - masa de la estructura

Con el fin de no obtener valores elevados de desplazamiento lateral en la respuesta inelástica de la estructura, se impuso al DRAIN un límite de seis veces el desplazamiento de fluencia para que el programa identificara la situación de colapso por deformación lateral excesiva. Para efectos del cálculo de índice de daño, se utilizó un valor de ductilidad de cinco.

índice de daño y se correlacionó con cada parámetro sísmico, por medio de gráficos que se muestran más adelante.

6. RESULTADOS

6.1 Buenas y malas correlaciones entre índices de daño y parámetros sísmicos.

De las correlaciones hechas, el índice de daño propuesto por Park y Ang (ID_{PA}) se correlaciona bastante bien con la Aceleración Espectral (S_a) y con la Energía de Entrada (E_i). Sin embargo, presenta malas correlaciones con la Aceleración Pico del Suelo (PGA) y con la Intensidad de Arias.

La tabla No.3 (VER APÉNDICE) muestra, a modo de ejemplo, los cálculos para una estructura de período igual a 0.5 s, amortiguamiento del 2% y resistencia 1. En la figura No.1 se muestra la correlación entre el ID_{PA} y el PGA para una estructura de $T=1.5s$ y $\xi=10\%$, claramente se observa que no existe relación alguna. Esta misma situación sucede cuando se intenta correlacionar el ID_{PA} con PGA e I_A , para todas las estructuras utilizadas.

6.2 Análisis de las buenas correlaciones: ID_{PA} vs. S_a

La figura N°2 muestra el resultado de las correlaciones entre el ID_{PA} y la Aceleración Espectral para una estructura con el 2% de amortiguamiento y resistencias 1 y 6.

La ecuación propuesta para obtener estas correlaciones tiene la forma:

$$\ln(ID_{PA}) = m \ln(S_A) + b \quad (4)$$

donde:

m y b - parámetros que se deben determinar

por medio de regresión.

Para este caso, se notó claramente que al aumentar la resistencia para una misma estructura con el mismo amortiguamiento, los datos (puntos discretos de la correlación) tienden a ubicarse más cercanos a la línea recta que los relaciona (fig.N°2).

Por otro lado, cuando se graficaron las correlaciones para las distintas estructuras (VER TABLA N°4 EN APÉNDICE), para estructuras con un 2% de amortiguamiento y distintos periodos se observó que las pendientes de las rectas de mejor ajuste m son ligeramente variables con las seis resistencias utilizadas, manteniéndose siempre dentro de un rango de 0.96 a 1.09 (cercano a la unidad) sin una tendencia particular. Los valores de b , tienden a ser cada vez menores (más negativos), conforme aumenta la resistencia, desde -1.12 hasta -3.5.

Al realizar el mismo procedimiento pero aumentando el amortiguamiento, se obtuvo una disminución de b . La mejor correlación se obtuvo para la estructura más flexible (de 1.5 segundos de período), el máximo amortiguamiento usado (10%) y la resistencia mayor.

6.3 Análisis de las buenas correlaciones: ID_{PA} vs. E_i

Por otra parte, la figura N°3 muestra el resultado de las correlaciones entre el ID_{PA} y la energía de entrada (E_i) para la misma estructura con el 2% de amortiguamiento, resistencias 1 y 6, para estructuras de 0.5 segundos.

La ecuación propuesta para obtener estas correlaciones tiene la forma:

$$\ln(ID_{PA}) = m \ln(E_i) + b \quad (5)$$

Al igual que el caso anterior, se notó que al aumentar la resistencia para un mismo valor de período y de amortiguamiento, los datos reales (puntos discretos de la correlación) tienden a ubicarse más cercanos a la línea recta que los relaciona (fig. N° 3).

Cuando se graficaron las correlaciones para las distintas estructuras (resultados en tabla No. 4, para estructuras con un 2% de amortiguamiento) se observó que las pendientes de las rectas de mejor ajuste m son ligeramente variables con las seis resistencias utilizadas, manteniéndose siempre dentro de un rango de 0.44 a 0.58 (cercano a 0.5) sin una tendencia particular. Los valores de b tienden a ser cada vez menores, conforme aumenta la resistencia, desde 0.32 hasta - 0.84.

En forma semejante al caso anterior, al aumentar el amortiguamiento se obtuvo una disminución de b . La mejor correlación se obtuvo para la estructura más flexible (de 1.5 segundos de período), el máximo amortiguamiento usado (10%) y la resistencia mayor.

En las mismas figuras N°2 y N°3, puede observarse también que tanto para la S_A como para la E_i , al usar la resistencia más baja considerada R_1 (menor coeficiente sísmico), se tiene un significativo grupo de registros sísmicos que provocan en las estructuras la ruina total ($ID_{PA} > 0.8$, algunos registros nacionales y todos los extranjeros). Sin embargo, con la máxima resistencia se obtuvo que prácticamente ningún registro de Costa Rica llega al límite de irreparabilidad ($ID_{PA} > 0.4$), incluso la mayoría se ubican por debajo del nivel que corresponde a daño leve ($ID_{PA} > 0.2$). Para la máxima resistencia se observa que los índices de daño obtenidos con sismos extranjeros se ubican mayormente entre el límite de irreparabilidad y el nivel que indica la ruina total, pero no más allá que esto. Lo anterior parece ser casi independiente del amortiguamiento y del período de vibración de la estructura excepto

para el caso del registro del sismo de México, sobre el cuál se comentará más adelante. Lo anterior permite afirmar que **al aumentarse la resistencia de los elementos estructurales, el daño en estas disminuye.**

6.4 Potencial destructivo de los registros costarricenses en comparación con los extranjeros.

Al observarse los datos discretos en los gráficos (puntos a partir de los cuales se calcularon las correlaciones), es muy importante notar que son los registros de sismos extranjeros los que presentan los mayores valores de índice de daño vs. parámetro sísmico (E_i o S_a). Esto es consistente para todos los valores de período, amortiguamiento y resistencia utilizados, lo que indica que los sismos extranjeros tienen un mayor potencial destructivo que los costarricenses.

Con respecto a los registros sísmicos obtenidos en otros países, debe resaltarse el caso del registro correspondiente al sismo de México, 1985, que produce valores altos de índice de daño vs. parámetro sísmico en estructuras flexibles (período de 1.5 segundos) y valores bajos en estructuras rígidas (período de 0.5 segundos). Lo anterior justifica que el registro del sismo de México utilizado fue obtenido en un acelerógrafo ubicado sobre depósitos lacustres de gran espesor que componen el suelo de la Ciudad de México. Esto provocó que se filtraran las frecuencias altas en la señal y que quedara un contenido de períodos más bien largos, con un período predominante cercano a dos segundos, lo que provocó que los mayores efectos de resonancia se dieran en la estructura de 1.5 segundos.

Con respecto a los resultados obtenidos a partir de sismos costarricenses, se observó una situación semejante a la anterior con el registro de Cóbano (1990) en componente transversal, que produce los más altos valores de índice de daño en estructuras flexibles y no

así en las rígidas. El registro de Cóbano fue obtenido a una distancia hipocentral aproximada de 60 Km, y al viajar la onda sísmica a través de esa distancia sufrió el filtrado de las altas frecuencias, quedando principalmente períodos largos en la señal. Esta situación provocó que sean las estructuras flexibles (de período largo) las más dañadas al ser sometidas a ese registro.

En estructuras con período de vibración de 0.5s (estructuras rígidas), el registro costarricense con mayor valor de índice de daño vs. parámetro sísmico es el de Piedras Negras (Alajuela, 1990 registrado en la Presa San Miguel, ICE) y se considerará por ahora como el máximo para estructuras rígidas en Costa Rica. Con respecto a registros extranjeros, es el registro de Lollole (1985) el que produce mayores valores de índice de daño en estructuras rígidas, lo cual es de esperar por su predominio de altas frecuencias y sus altos valores de aceleración.

Al observar los gráficos de las mejores correlaciones obtenidas (resistencias máximas), puede verse que los datos correspondientes a registros costarricenses se ubican casi uniformemente hacia abajo (con valores menores de índice de daño vs. parámetro sísmico) a partir de los considerados como máximos, pero siempre a lo largo de la línea de correlación.

A pesar que la historia de instrumentación sísmica en Costa Rica es relativamente reciente, los registros con los que se cuenta fueron obtenidos durante los sismos más importantes sucedidos en este país en las dos últimas décadas. Esto hace pensar que en este país no se producirán registros que den valores de índice de daño sustancialmente mayores a los que se han calculado, ya que los mismos forman una nube de puntos que coincide con la correlación, hasta llegar a los valores máximos considerados hasta ahora como límites para Costa Rica: Cóbano en PTS (Hospital Monseñor Sanabria, Puntarenas),

para estructuras flexibles y Piedras Negras en PSM (Presa San Miguel, ICE) para estructuras rígidas. Si se obtienen registros que superen estos valores, se aislarían de la nube de puntos (cercanos entre sí) que corresponde a registros obtenidos hasta ahora. Forma que refleja el peligro sísmico del país.

En el futuro será necesario observar la ocurrencia de sismos fuertes en el campo cercano y obtener sus registros acelerográficos incorporarlos con los resultados de este estudio para comprobar lo dicho anteriormente.

En lo referente a registros extranjeros, debe notarse que corresponden a algunos de los eventos más destructivos obtenidos a nivel mundial, y que de alguna manera los valores de índice de daño vs. parámetro sísmico calculado estaría representando los límites máximos para la zona donde fueron registrados, con excepción de Costa Rica.

7. CONCLUSIONES

- Se obtuvieron buenas correlaciones entre el índice de daño de Park y Ang y la Aceleración Espectral, así como entre este índice y la Energía de Entrada.

- Las correlaciones mejoran al aumentarse la resistencia de las estructuras. En forma semejante, al incrementarse la resistencia el daño tiende a disminuir.

- Se obtuvieron deficientes correlaciones entre el índice de daño y los otros parámetros sísmicos considerados. En particular el PGA es un mal parámetro para correlacionar el daño.

- Para todas las resistencias, los registros costarricenses tienden a ubicarse por debajo del límite correspondiente al daño leve y los extranjeros se ubican sobre este valor; lo cual parece ser independiente del amortiguamiento

y del periodo de la estructura, e indica que los registros nacionales tienen un potencial de daño menor que los extranjeros utilizados.

- El registro del sismo de México daña principalmente estructuras flexibles (período de 1.5 segundos). Algo similar ocurre con el registro costarricense de Cóbano y ambas situaciones parecen ser producto del filtrado de frecuencias altas que sufrieron las ondas sísmicas desde el hipocentro hasta el punto de registro, y debido a la vibración propia del depósito de suelo.

- No se han obtenido en Costa Rica registros sísmicos que provoquen daños mucho mayores que los calculados en este estudio, siendo el de Cóbano (en PTS) el máximo para estructuras flexibles y el de Piedras Negras (en PSM) el máximo en estructuras rígidas. Se tiende a que los valores de índice de daño vs. parámetro sísmico formen una nube de puntos bastante cercanos entre ellos, lo cual parece ser la forma en que queda reflejada la sismicidad de la zona. No ha sido obtenido hasta la fecha un registro que produzca un valor de índice de daño mayor que obtenidos en este trabajo, lo que indicaría entonces la posibilidad de tener más daños en Costa Rica.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Bannon H., et. al., *Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames*. ASCE, Journal of Structural Division, Vol 107, No. 579, Setiembre de 1981, pp 1713-1729.

2. EERI. Proceedings US.-Costa Rica Workshop. *Costa Rica Earthquakes of 1990-1991*. Effects on Soils and Structures.

3. Kanann, A.E., et. al., *Drain 2D, A General Purpose Computer Program for Dynamics Analysis of Plane Structures*. Reporte UBC/EERC - 76 - 06. Universidad de California, Berkeley, 1976.

4. Park, Y. J., et. al., *Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete*. ASCE, Journal of Structural Engineering, Vol III, No. 4, Abril, 1985, pp 740 - 757.

5. Park, Y. J., et. al., *Damage Limiting Aseismic Design of Buildings*. Third National Conference in Earthquake Engineering, Vol III, Charleston, South Carolina, Agosto 1986, pp 1721 - 1729.

6. Powell, G. H., et. al., *Seismic Damage Prediction by Deterministic Methods: Concepts and Procedures*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 16, 1988, pp 719 - 734.

7. Reinhorn, A. M., et. al., *A Post-Earthquake Damage Evaluation Strategy for R/C Buildings*. Proc. 4th National Conference on Earthquake Engineering, Vol II, Mayo 1990, Palm Springs, California, pp 1047-1056.

8. Uang, C. M., et. al., *Evaluation of Seismic Energy in Structures* Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol 19, 1990, pp. 77- 90.

APÉNDICE:

Tabla N° 1. Lista de registros sísmicos utilizados

1. Registros sísmicos Costarricenses					
Sismo	Estación	Epidistanc (Km)	T _D (s)	T _g (s)	a _{máx} (cm/s ²)
1. Piedras Negras (22-12-90)	ALJ	15.50	4.21	0.45	427.7
	CTG	43.6	7.37	0.55	292.2
	PSM-ICE	6.00	3.03		494.6
	CTG (2*)	43.6	7.37	0.55	584.4
	CTG (3*)	43.6	7.37	0.55	850.0
2. Cóbano (25-03-90)	PTS	44.7	6.31	1.80	243.3
3. Limón (22-04-91)	CMA	102.8	13.66	0.45	187.6
	CTG	87.2	15.88	0.60	210.7
	CCH	73.9	13.05	0.90	80.22
2. Registros sísmicos extranjeros					
1. México (1985)	SCT				
2. Chile (1985)	Llolleo	50.00	34.02	0.70	696.51
3. Valle San Fernando (1971)	Pacoima Dam	7.20	8.22		1147.77
4. Imperial Valley (1940)	El Centro	9.30	1.98	0.55	333.54
5. San Salvador (1986)	CIG	9.00	1.52	0.50	667.08

En la **Tabla N° 1:**

T_g : periodo predominante de la señal, T_D: tiempo en el que se da la aceleración máxima, a_{máx}: aceleración máxima del registro. 2* y 3*: Modificación a los registros obtenidos en la estación de Cartago - Parque Central utilizando transformadas de Fourier para amplificar 2 y 3 veces las amplitudes correspondientes al rango de frecuencias 2.5 - 10 Hz, respectivamente. Esto produce un efecto que se concentra sobre las estructuras de períodos menores a 0.5 seg.

Tabla N°2. Momentos nominales de resistencia (M_P) de las columnas en las estructuras modeladas, en ton*m (Entre paréntesis los coeficiente sísmicos de cedencia)

Período	Niveles de Resistencia					
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆
0.50 seg.	15.04	21.06	27.08	33.09	39.11	45.13
	(0.18)	(0.26)	(0.33)	(0.40)	(0.48)	(0.55)
1.00 seg.	7.32	10.25	13.18	16.11	19.04	21.97
	(0.09)	(0.13)	(0.17)	(0.20)	(0.24)	(0.28)
1.50 seg.	4.91	6.87	8.83	10.79	12.75	14.72
	(0.06)	(0.09)	(0.11)	(0.13)	(0.16)	(0.18)

Tabla N°3. Valores de índice de daño y parámetros sísmicos. Estructura con T=0.50 seg, Amort=2% y resistencia 1 L: componente longitudinal, T: componente transversal

		INTENS. ARIAS	PGA (m/s ²)	Sa (m/s ²)	E _I (m ² /s ²)	ID _{PA}
P. NEGRAS (ALAJUELA)	L	1.360	2.638	10.027	0.844	1.254
	T	1.707	4.306	9.376	0.716	1.204
P. NEGRAS CARTAGO	L	0.265	2.349	3.849	0.044	0.385
	T	0.227	2.619	4.255	0.076	0.437
P. NEGRAS (P.SAN MIGUEL)	L	1.801	6.326	2.857	0.015	0.267
	T	2.700	8.820	3.321	0.037	0.317
P. NEGRAS (CART. X2)	L	1.058	4.698	7.698	0.178	0.568
	T	0.908	5.238	8.510	0.304	0.671
P. NEGRAS (CART.FO.X3)	L	1.496	5.650	5.025	0.077	0.447
	T	1.407	6.780	4.826	0.090	0.390
COBANO (PUNTARENAS)	L	0.295	2.136	6.472	0.257	0.556
	T	0.673	2.425	6.904	0.231	1.400
LIMON (B. CMA UCR)	L	0.475	1.447	3.994	0.163	0.364
	T	0.529	1.872	5.985	0.192	0.466
LIMON (CARTAGO)	L	1.180	2.511	7.642	0.517	1.345
	T	0.812	2.103	4.375	0.184	0.855
LIMON (P. CACHI)	L	0.181	1.350	4.019	0.111	0.408
	T	0.174	0.818	3.475	0.073	0.287
LIMON (S.ISIDRO GRAL)	L	0.623	1.888	3.900	0.090	0.404
	T	0.479	1.441	3.126	0.073	0.285
MEXICO		2.217	1.647	3.226	0.052	0.435
LLOLLEO		14.223	6.983	22.260	7.118	4.206
PACOIMA		8.324	11.478	20.004	1.933	1.507
EL CENTRO		1.933	3.085	12.009	0.682	1.293
S SALVADOR		2.486	6.808	15.550	1.119	1.510

Tabla 4. Ecuaciones de correlación propuestas para estructuras con un 2% de amortiguamiento y distintos coeficientes sísmicos

Periodo (s)	Coefficiente Sísmico	x = aceleración espectral y = ID _{PA}	x = energía de entrada y = ID _{PA}
0.5	0.18	Ln (y) = 1.09* Ln (x) - 2.40	Ln (y) = 0.47* Ln (x) + 0.32
0.5	0.26	Ln (y) = 1.19* Ln (x) - 2.93	Ln (y) = 0.50* Ln (x) + 0.02
0.5	0.33	Ln (y) = 1.21* Ln (x) - 3.22	Ln (y) = 0.49* Ln (x) - 0.24
0.5	0.40	Ln (y) = 1.12* Ln (x) - 3.30	Ln (y) = 0.46* Ln (x) - 0.53
0.5	0.48	Ln (y) = 1.09* Ln (x) - 3.43	Ln (y) = 0.44* Ln (x) - 0.74
0.5	0.55	Ln (y) = 1.05* Ln (x) - 3.51	Ln (y) = 0.43* Ln (x) - 0.91
1.0	0.09	Ln (y) = 1.02* Ln (x) - 1.53	Ln (y) = 0.52* Ln (x) + 0.40
1.0	0.13	Ln (y) = 1.13* Ln (x) - 1.87	Ln (y) = 0.58* Ln (x) + 0.27
1.0	0.17	Ln (y) = 1.13* Ln (x) - 2.18	Ln (y) = 0.58* Ln (x) - 0.03
1.0	0.20	Ln (y) = 1.14* Ln (x) - 2.42	Ln (y) = 0.58* Ln (x) - 0.26
1.0	0.24	Ln (y) = 1.09* Ln (x) - 2.58	Ln (y) = 0.56* Ln (x) - 0.51
1.0	0.28	Ln (y) = 1.06* Ln (x) - 2.72	Ln (y) = 0.54* Ln (x) - 0.72
1.5	0.06	Ln (y) = 0.96* Ln (x) - 1.12	Ln (y) = 0.52* Ln (x) + 0.29
1.5	0.09	Ln (y) = 0.99* Ln (x) - 1.46	Ln (y) = 0.53* Ln (x) - 0.02
1.5	0.11	Ln (y) = 1.03* Ln (x) - 1.71	Ln (y) = 0.55* Ln (x) - 0.22
1.5	0.13	Ln (y) = 1.03* Ln (x) - 1.90	Ln (y) = 0.55* Ln (x) - 0.41
1.5	0.16	Ln (y) = 0.99* Ln (x) - 2.09	Ln (y) = 0.53* Ln (x) - 0.65
1.5	0.18	Ln (y) = 0.97* Ln (x) - 2.25	Ln (y) = 0.52* Ln (x) - 0.84

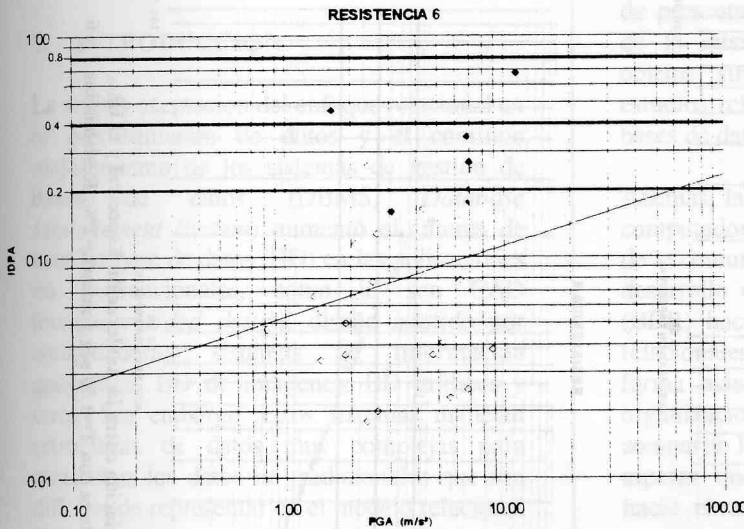


Figura 1. Correlación entre el PGA y el ID_{PA} Estructura con T=1.50 seg y amort.=10%

Simbología para figuras 1, 2 y 3:

- ◆: Registros sísmicos extranjeros.
- ◇: Registros sísmicos de Costa Rica

Unidades

PGA: m/s²

Aceleración Espectral: m/s²

Energía de Entrada: m²/s²

Según Park y Ang:

ID_{PA}=0.8: ruina total

ID_{PA}=0.4: límite de irreparabilidad

ID_{PA}=0.2: daño leve

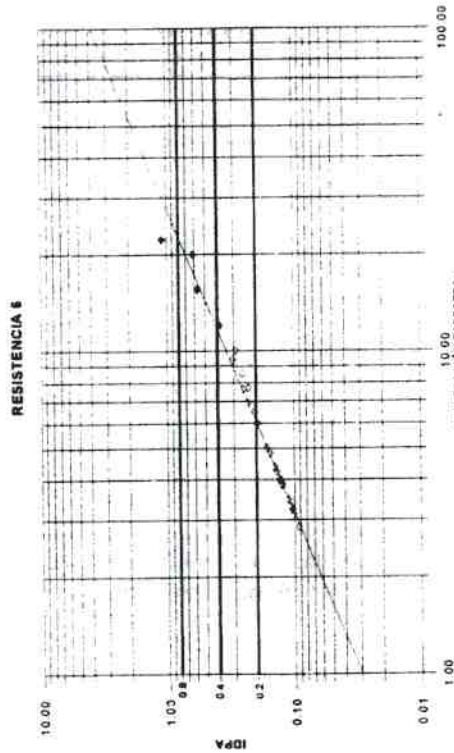
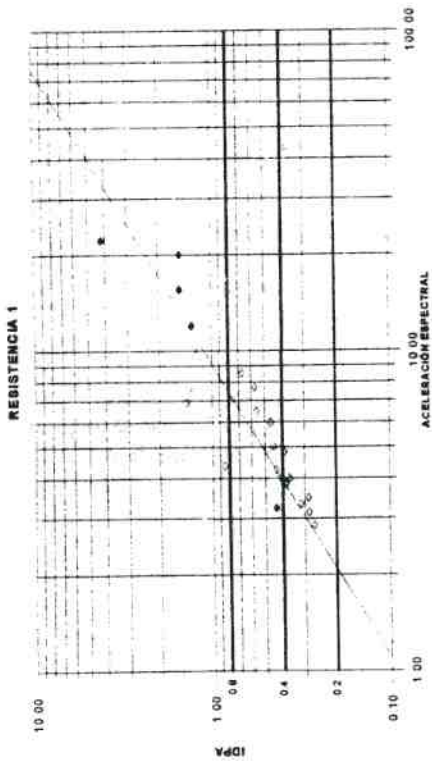
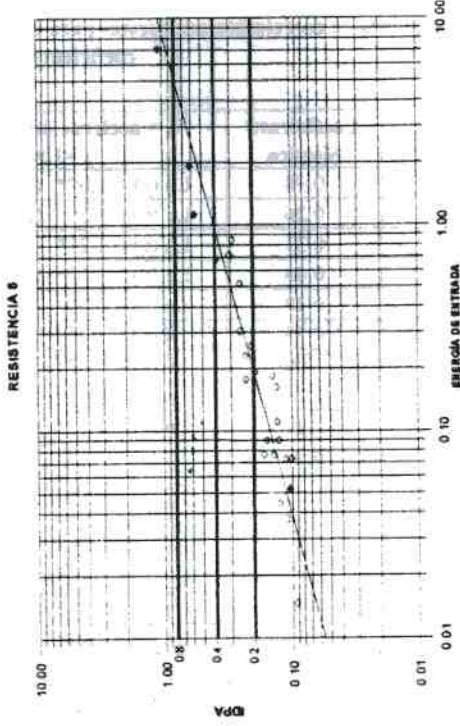
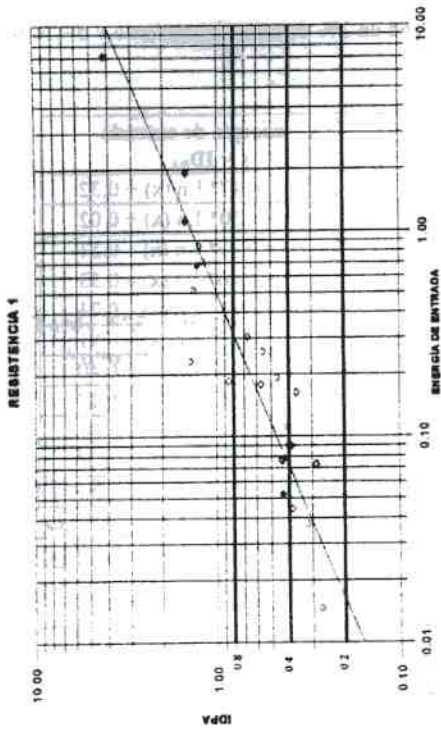


Figura 3. Correlación entre la energía de entrada y el IDPA Estructura con T=0.50 seg y amort.=2%. Resistencias 1 y 6

Figura 2. Correlación entre la Aceleración Espectral y el IDPA Estructura con T=0.50 seg y amort.=2%. Resistencias 1 y 6