

# Espectros Adimensionales de Respuesta. Un nuevo criterio de confección de interpretación de espectros elásticos a partir de registros sísmicos reales.

**Autores: Ing. Raúl Zaradnik (1)  
Ing. Elbio Villafaña (2)**

## RESUMEN

El efecto de la duración de un sismo en el comportamiento estructural ha sido tradicionalmente ignorado en los códigos de diseño mientras que la magnitud Richter del sismo no aparece explícitamente definida.

En este trabajo se presenta un criterio para definir espectros elásticos que se ha derivado del estudio de ciento cinco sismos reales producidos en todo el mundo, tomando como base de definición de los espectros la duración maestra, la magnitud Richter, la máxima aceleración prevista del suelo durante el sismo de diseño y su impulso aceleratriz.

Asimismo se presenta un criterio de representación adimensional de espectros elásticos de aceleración, velocidad y desplazamiento y leyes envolventes derivadas para los mismos.

Finalmente se establece una serie de conclusiones del trabajo.

## SUMMARY

The effect of the duration of an earthquake in the structural behavior has been traditionally ignored in the design codes, while the Richter magnitude of the earthquake does not appear explicitly defined.

In this work it is presented a criterion to define elastic spectra that it has been derived from the study of a hundred and five real earthquakes produced all over the world taking as spectra definition base the master duration, the Richter magnitude, the maximum anticipated acceleration of the soil during the design earthquake and its accelerative impulse.

It is also presented a criterion of adimensional representation of elastic acceleration spectra, speed and displacement, and hi-fidelity quantities derived for them.

Finally it is established a series of conclusions about the work.

---

1. Ing. Civil. Director del Instituto Técnico de Investigaciones y Ensayos de Materiales (I.T.I.E.M.), Jefe de Trabajos Prácticos de la Cátedra de Estructuras Especiales en la Facultad de Ingeniería de la UNC. Becario Investigador del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Cuyo (C.I.U.N.C.).

2. Ing. Construcciones, Titular de la Cátedra de Estructuras Especiales en la Facultad de Ingeniería de la UNC. Director de Beca del Consejo de Investigación de la Universidad Nacional de Cuyo (C.I.U.N.C.).

## LOS TERREMOTOS Y SU RESPUESTA ESPECTRAL

Las vibraciones verificadas durante los terremotos pueden producir severos daños a los edificios y a sus equipamientos. La aceleración, la velocidad y el desplazamiento del suelo al transmitirse a través de la estructura, muchas veces resultan amplificados, y entonces se producen fuerzas y desplazamientos que pueden exceder los admisibles para esa estructura, o por lo menos para un sector de la misma. Son muchos los factores que influyen en el movimiento de la tierra y de su amplificación. Paralelamente, un claro entendimiento de cuáles son los factores que influyen en la respuesta de las estructuras y del equipamiento es fundamental para realizar un diseño seguro y económico.

Usualmente, los terremotos son mensurados por medio de equipos que registran la aceleración del suelo en un sitio particular. El registro de aceleraciones o acelerograma, luego de haber sido corregido, (eliminando los errores instrumentales y de ajustes inherentes a la medición) se integra para obtener los registros de velocidad y de desplazamiento en función del tiempo.

Los máximos valores del movimiento del suelo (llámese aceleración, velocidad o desplazamiento) son de sumo interés para los analistas y diseñadores antisísmicos. Sin embargo, tales parámetros no alcanzan a describir la intensidad de las sacudidas que las estructuras y los equipos experimentan. Otros factores, como la magnitud del terremoto, la distancia a la falla o al epicentro, la duración de la fase fuerte de terremoto, las condiciones del suelo del lugar y el contenido de frecuencias del movimiento, también influyen en la respuesta de una estructura. Muchos de esos efectos se representan muy bien por medio de los espectros, los cuales describen la máxima respuesta de un oscilador amortiguado de un solo grado de libertad y de frecuencia variable. El estudio de muchos espectros de respuesta, de sismos catastróficos, o no tanto, permiten obtener un espectro de diseño que represente la amplificación del terremoto para varios períodos estructurales [1],[2],[3].

## CARACTERÍSTICAS DE LOS TERREMOTOS

Las características propias de los terremotos que más parecen importar para las aplicaciones ingenieriles de [1],[3], [8] y [9] son:

- a- El pico máximo del terremoto, hablando de aceleración, velocidad y desplazamiento.
- b- La duración del terremoto.
- c- El contenido de frecuencias del terremoto.

En especial, la duración del terremoto tiene efecto en el nivel de destrucción, y está comprobado que un terremoto de aceleración moderada pero de gran duración causa más daño que un terremoto de gran aceleración pero de corta duración. Durante el desarrollo de la investigación [11], se utilizó el criterio de Page y Bolt [9] que propusieron definir la duración del terremoto a través de la llamada "duración maestra" es decir, el intervalo de tiempo entre el primer y el último pico de aceleración de valor especificado (usualmente  $0.05g = 49 \text{ cm/s}^2$ ).

## LOS ESPECTROS ADIMENSIONALES

Los espectros conocidos y popularizados entre los Profesionales del Diseño Sismorresistente generalmente son dimensionados [1],[4], [7], es decir, sus parámetros poseen unidades.

La apariencia de los mismos es muy dispar y difícilmente puedan sacarse conclusiones definitivas sin aplicar hipótesis simplificadoras [4].

Durante la investigación que dio origen a este trabajo [11] se propuso representar los espectros por medio de gráficos adimensionales, con la sorpresa de encontrar que los mismos respondían a formas y expresiones completamente comparables, diferenciándose sólo cuando los tipos de suelo cambiaban. Es decir, mientras se representaran espectros de sismos registrados en suelos semejantes, las formas y expresiones de sus gráficos adimensionales eran casi coincidentes, mientras que se producían fuertes diferencias para espectros calculados a partir de registros sísmicos obtenidos en lugares donde los suelos eran muy diferentes. Por esta razón se normalizaron los tipos de suelos a

considerar en este trabajo, distinguiendo tres tipos o familias fundamentales:

Suelos tipo 1 = Rocas y suelos duros o rígidos.

Suelos tipo 2 = mantos de suelo poco cohesible o suelos de arcillas rígidas.

Suelos tipo 3 = Mantos de arcillas medias a livianas y arenas sueltas.

## PARÁMETROS ADIMENSIONALES

Ya desde 1994 [10] se discute en el ámbito de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo sobre el modo en que los espectros dimensionados pueden ser representados por medio de espectros adimensionales. En la presente investigación se han utilizado los siguientes parámetros adimensionales:

### 2.1 Para el período

$$t = \frac{A_{\text{máx}}}{J} * T$$

donde: T = período noval, evaluado como  $T = 2 * l * (m/K)^{1/2}$

$A_{\text{máx}}$  = máxima aceleración del suelo

J = Impulso aceleratriz del sismo, evaluado por definición [10] como:

$J = \int A_g(t) * dt$ , es decir la integral en la duración del sismo de su aceleración.

El período T es constante y único para los sistemas lineales, pero en los sistemas no lineales es variable, por ello se utiliza el período noval, es decir, al origen o al comienzo de la curva Rigidez-Deformación.

### 2.2 Para la aceleración

$$a(t) = \frac{T}{J} * A(T)$$

para la cual A(T) es el valor espectral de la aceleración al período T, y los demás parámetros son conocidos.

### 2.3 Para la velocidad

$$v(t) = \frac{2 * l}{J} * V(T)$$

para la cual V(T) es el valor espectral de la velocidad al período T

### 2.4 Para el desplazamiento

$$d(t) = \frac{(2 * l * D)^2}{J * T} * D(T)$$

para la cual  $D(T)$  es el valor espectral del desplazamiento al período  $T$

## RELACIÓN ENTRE PARÁMETROS PROPIOS DE LOS SISMOS EVALUADOS.

Los parámetros propios de los sismos son:

- a- La máxima aceleración del terreno:  $A_{m\acute{a}x}$
- b- La duración del sismo:  $D$
- c- El impulso aceleratriz:  $J$ ; y
- d- La magnitud Richter.  $M_r$

Para casi el 50% de los sismos estudiados se conocían sus Magnitudes Richter [9] y organizándolos para magnitudes constantes se concluyó que en el plano  $A_{m\acute{a}x} * D$  versus  $J$  se alineaban, por lo cual se planteó que entre los parámetros propios existe la siguiente relación:

$$A_{m\acute{a}x} * D = m * J$$

$$m = 21,41 - 2,08 * M_r$$

Estas simples relaciones y su gráfico (figura 1) permiten entender por qué se dice que un sismo de magnitud dada, es más dañino mientras mayor es su duración.

Además, estas relaciones explicarían en parte la idea de que "para diseñar estructuras especiales, para establecer espectros de diseño, y para evaluar el máximo desplazamiento y daño que podría ocurrir en un lugar, se podrían utilizar pulsos aislados de aceleraciones que representen el sismo esperado"[13]. Mientras el valor del impulso aceleratriz  $J$  no sufra variaciones importantes, los resultados posteriores deberían ser semejantes.

Está claro que la importancia práctica de estas expresiones es obtener el valor del impulso aceleratriz  $J$ , para un sismo de magnitud Richter conocida, con una duración determinada y una máxima aceleración del suelo impuesta.

## RELACIÓN ENTRE ACELERACIÓN Y PERÍODO ADIMENSIONALES

Existe una función continua propuesta en [11] que relaciona la aceleración adimensional con el período adimensional que es del tipo:

$$a(t) = \frac{A t^2}{1 + B t^3} + C t^2 + D t$$

donde las constantes  $A$ ,  $B$ ,  $C$  y  $D$  debieron determinarse por procedimientos estadísticos y resultaron ser:

$$A = 62.61 * (TS)^{1/2} - 34.86$$

$$B = 161.33 + [32.27 - 22.48 * (TS)^{1/4}] * c\% - 112.4 * (TS)^{1/4}$$

$$C = 0.0 \quad ; \quad D = 1.0$$

donde  $c\%$  = amortiguamiento considerado, en por ciento del crítico.

TS = tipo de suelo, según:

- 1 = Rocas y suelos duros o rígidos;
- 2 = Mantos de suelo poco cohesible o suelos de arcillas rígidas;
- 3 = Mantos de arcillas medias a livianas y arenas sueltas.

No obstante conocer la anterior expresión, es interesante plantear la relación entre la aceleración adimensional y el período adimensional en términos de líneas envolventes rectas. Entonces, la relación se debe dividir en tres [3] regiones  $a_{t1} = \frac{a_0}{t_{01}} * t$  (que se ven en las figuras 2 y 3).

**a- Región de aceleración dimensional máxima espectral constante**, con aceleración adimensional de valor  $a_{t1}$  dada por la siguiente ecuación:

cuyas constantes son:

$$a_0 = (2.188 * TS - 0.667) - (0.113 * TS - 0.033) * c\%$$

$$t_{01} = 0.10 + 0.03 * c\%$$

donde  $c\%$  = amortiguamiento considerado, en por ciento del crítico.

TS = tipo de suelo, según:

- 1 = Rocas y suelos duros o rígidos ;
- 2 = Mantos de suelo poco cohesible o suelos de arcillas rígidas;
- 3 = Mantos de arcillas medias a livianas y arenas sueltas.

**b- Región de aceleración dimensional máxima espectral parabólica**, con aceleración adimensional de valor  $a_{t2} = a_0$ , que se extiende desde el período adimensional  $t^{01}$  hasta el período adimensional de valor  $t_{02} = a_0$

**c- Región de máxima aceleración dimensional espectral proporcional**, con aceleración adimensional de valor  $a_{t3}$ , dada por la siguiente ecuación:

$$a_{t3} = t$$

## RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN ADIMENSIONALES

Un aspecto interesante de la investigación realizada es la relación que vincula a la velocidad y aceleración adimensionales, independientemente del amortiguamiento que se considere. La gráfica (figura 4) permite manifestar que el cociente entre la velocidad y la aceleración adimensionales se encuentra entre los siguientes límites:

a- Inferior:  $v/a = 1.4 * e^{-3 * \text{sq}(t)}$

a- Superior:  $v/a = 1.4 * e^{\{0.25 - 1.5 * \text{sq}(t) - \text{Sq}[\text{sq}(t)]\}}$

(Nota:  $\sqrt{\quad}$  equivale a raíz cuadrada).

## RELACIÓN ENTRE VELOCIDAD Y DESPLAZAMIENTO ADIMENSIONALES

Las gráficas (figuras 5 y 6) permiten manifestar que las velocidades y los desplazamientos adimensionales se relacionan diferenciadamente según tres ( $V$ ) regiones, pero que resulta favorable a los efectos de diseño utilizar la siguiente relación simple  $v = d$ , donde  $v$  es la máxima velocidad espectral adimensional y  $d$  es el máximo desplazamiento espectral adimensional. Cuando se hace una diferenciación por regiones, se puede poner:  $V = \beta * d$ , con  $\beta \geq 1$

## CONCLUSIONES

Este trabajo afronta la discusión sobre los criterios para establecer espectros elásticos de diseño con las siguientes conclusiones.:

1. Aporta un modo de incluir la magnitud Richter del sismo de diseño y su duración prevista.
2. Establece un criterio de comparación entre seguridad y economía.
3. Presenta un método repetible, comparable y de fácil normalización.
4. Genera un procedimiento para establecer valores justificables del coeficiente básico para el diseño sismorresistente, cuando se apliquen métodos estáticos simplificados.
5. Plantea la necesidad de estudiar espectros de energía para avanzar sobre el cálculo no lineal de estructuras con bases científica y económicamente aceptables.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Cakmak, A.S., Soil Response Spectrum, Princeton University, Estados Unidos de América.
2. Cakmak, A.S., Stochastics Methods in Earthquake Engineering, Princeton University, Estados Unidos de América.
3. Cakmak, A.S., Ground Motion and Engineering Seismology, Princeton University, Estados Unidos de América.
4. Beskos, D.E. y Anagnostopoulos S.A., Computer Analysis and Design of Earthquake Resistance Structures, Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Patras, Grecia.
5. Ariman, T, Hamada M., Singhal , A.C. y Cakmak, A.S., Recent Advances in Lifeline Earthquake Engineering, trabajo conjunto entre Estados Unidos de América y Japón.
6. Alarcón, R., Crempien, J. y Saragoni G.R., Propiedades Gaussianas de los Acelerogramas de Terremotos, de las XX Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural y VI Simposio Panamericano de Estructuras, Córdoba, Argentina, 1979.
7. Kanai, K., An Empirical Formula for the Spectrum of Strong Earthquake Motion, Segunda Conferencia Mundial sobre Ingeniería Sísmica, Tokio, Japón, 1960.
8. Duke, C.M., Luco, J.E., Carriveau, A., Hradilek, P., Lastrico, R. y Ostrom, D., Strong Earthquake Motion and Site Conditions, en la edición del volumen 60 del Bull. Seismics Society of America, de 1970.
9. Manual de diseño sismorresistente, editado por Farzad Naiem, de la serie de Ingeniería Estructural.
10. Zaradnik, R., Interacción Suelo Estructura, con comportamiento dinámico de estructuras antisísmicas sobre fundaciones flexibles. CIUNC, 1994.
11. Zaradnik, R., Confección e interpretación de espectros de respuesta a partir de registros sísmicos, CIUNC, 1997.
12. Mc Cann y Shah, Determining Strong Motion Duration of Earthquake, Bull. Seism. Soc. Am. 69 N° 4, pág.1235 a 1265, de 1979.
13. Bonelli, P., Cordero, P. y Gómez, E., Evaluación de los efectos de pulsos largos de velocidad en la respuesta sísmica de la estructura. Tercer Encuentro de Investigadores y Profesionales Argentinos de la Construcción, Mendoza, 1997.

**Espectros Adimensionales**  
Escala con Magnitudes Richter

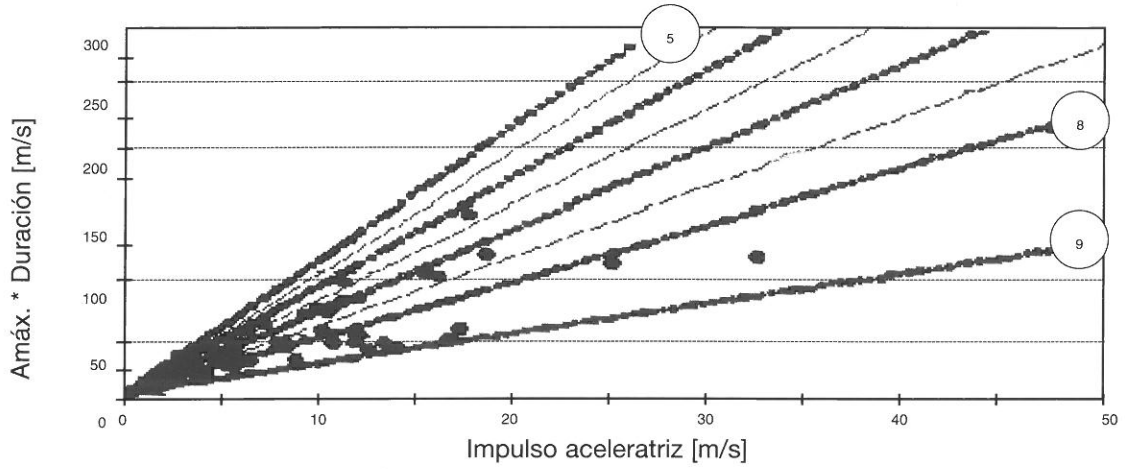


Figura 1: Relación entre parámetros propios de los sismos evaluados

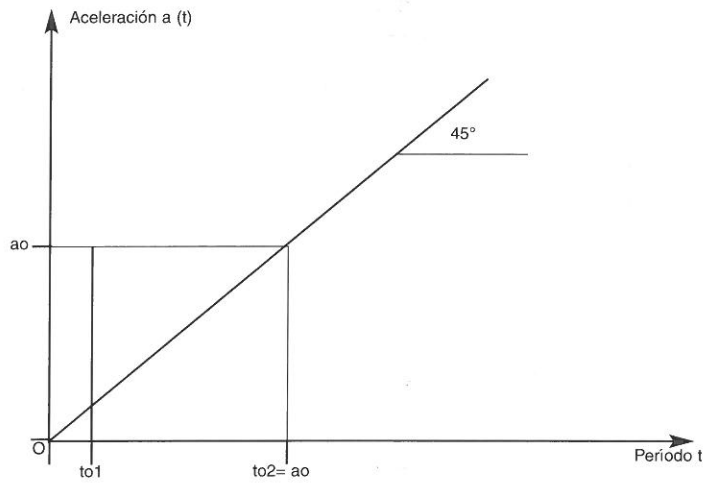


Figura 2: Relación entre aceleración y período adimensionales  
Simplificación lineal

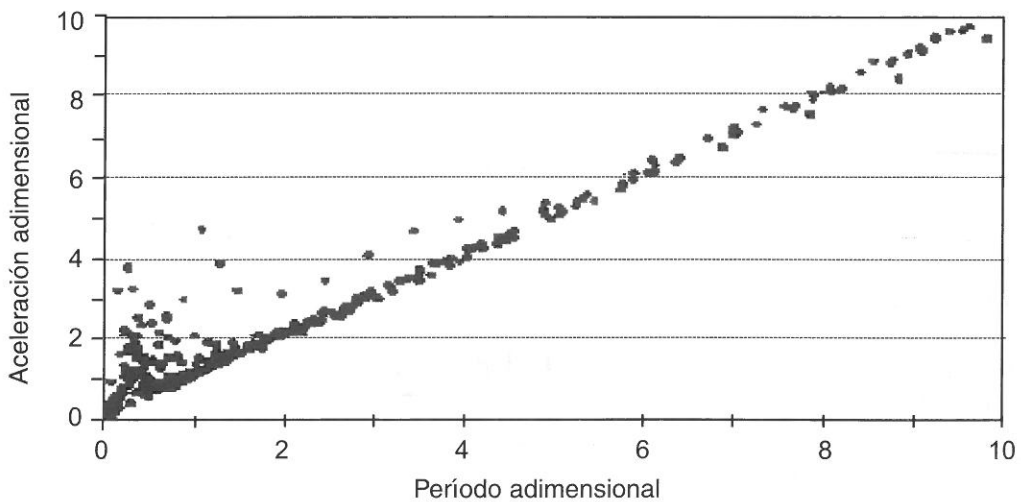


Figura 3: Relación entre aceleración y período adimensionales  
Evaluación real en el sismo de México de 1985

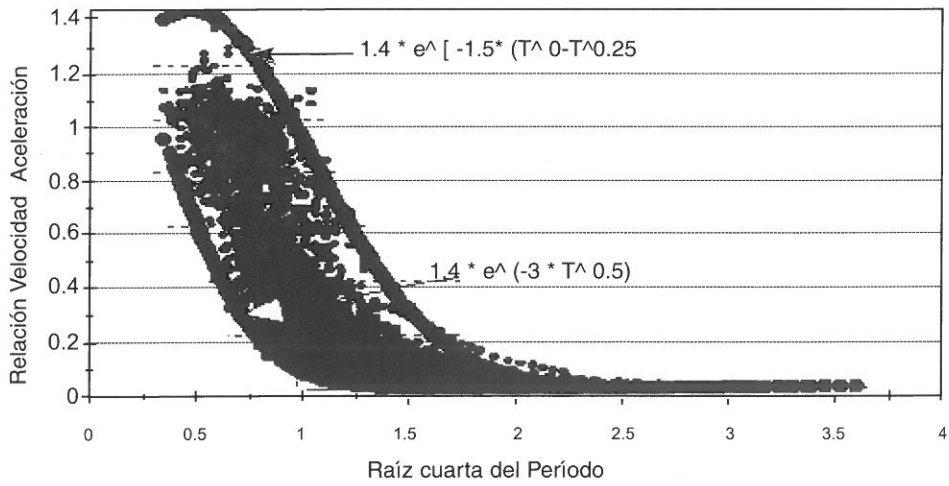


Figura 4: Relación entre velocidad y aceleración adimensionales  
Considerando todos los sismos analizados

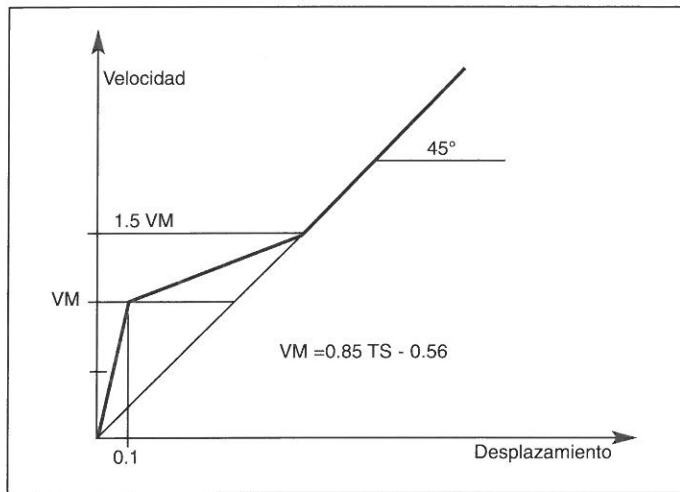


Figura 5: Relación entre velocidad y desplazamiento adimensionales  
Relación lineal simplificada

**Espectro adimensional**  
Sismos de México con amort. 0%

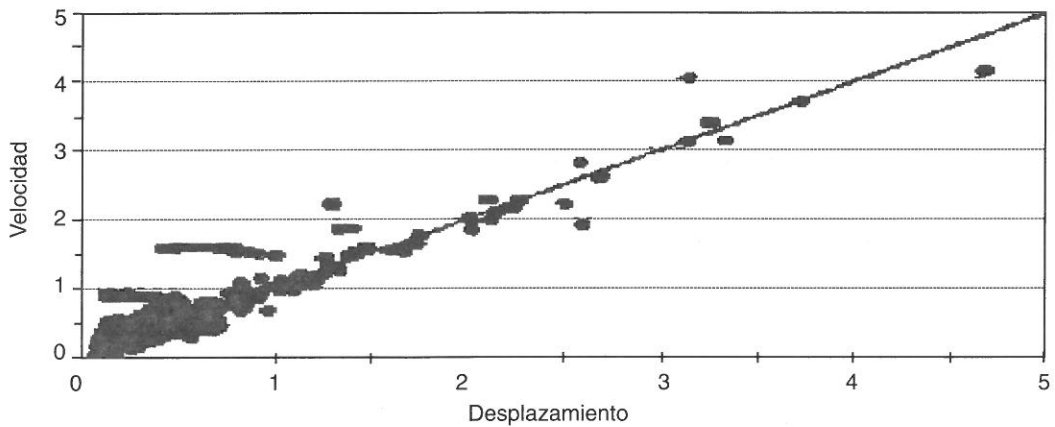


Figura 6: Relación entre velocidad y desplazamiento adimensionales  
Relación obtenida para el sismo de México de 1985