



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Seccional Manizales



PLAN INTEGRAL DE PREVENCIÓN DE DESASTRES Y ATENCIÓN DE EMERGENCIAS EN MANIZALES



ANÁLISIS DE LOS REGISTROS SÍSMICOS EN MANIZALES

Jorge Eduardo Hurtado G.
P.A. Universidad Nacional

1. Introducción.

La ciudad de Manizales ha presentado en su corta historia una intensa actividad sísmica, por causa de su localización en la zona occidental de Colombia, la cual es la región de mayor actividad de subducción de las placas que componen el lecho del Océano Pacífico. Como consecuencia, los terremotos que han sacudido la ciudad han provocado graves pérdidas, tanto humanas como económicas en diferentes ocasiones.

Una de las mejores medidas para la mitigación de las pérdidas posibles que fenómenos semejantes puedan causar en el futuro es el registro de las aceleraciones del terreno, cuyo análisis permite comprender el comportamiento de las edificaciones y tomar las medidas preventivas hacia el futuro.

A pesar de que los sismos más intensos que han ocurrido en la ciudad no han sido registrados, se dispone de un buen número de registros de otros eventos, los cuales permiten comprender el comportamiento de los suelos de la ciudad ante los mismos, y por ende, el de las estructuras apoyadas en dichos suelos. Por otra parte, se puede a partir de tal estudio proponer ecuaciones de



diseño particulares para la geología local, como fórmula más confiable que el uso de ecuaciones basadas en sismos ocurridos en el extranjero.

En el presente reporte de investigación se recoge toda la información disponible sobre registros de terremotos en la ciudad de Manizales, con el fin de examinar la respuesta de los suelos locales y proponer espectros de diseño sismoresistente de estructuras, como contribución al desarrollo de una zonificación sísmica de la ciudad. No hace parte de la presente investigación lo concerniente a los datos históricos sobre daños y pérdidas materiales y humanas causadas por los sismos ocurridos, como tampoco lo referente a sus intensidades.

2.- Registros de sismos en Manizales

La historia de los registros de sismos en la ciudad comienza con la instalación de un acelerómetro tipo Montana en el año de 1967 por parte de la Coast and Geodetic Survey de los Estados Unidos, como parte de un estudio de prefactibilidad para un canal interoceánico en el occidente del país. Este equipo fue instalado en el Banco del Comercio y ha sido administrado por el Instituto Geofísico de los Andes. Desde el año de 1989 se encuentra instalado en la Universidad de Caldas.

Dicho instrumento registra las tres componentes de aceleración de un sismo por medio mecánico, y la información queda registrada en papel fotográfico, para ser digitalizada manualmente. Hasta donde llega el conocimiento del autor, de los registros obtenidos en su primera estación, el Banco del Comercio, solamente se han reportado cinco en la bibliografía: el primero, en un estudio para rehabilitación de edificios averiados (ref. 1), y los cuatro restantes en una tesis de grado de la Universidad Nacional en Medellín (ref. 2). Se ignora si el acelerómetro ha registrado eventos recientes en su nueva ubicación.

Posteriormente, en el año de 1988, el Instituto Nacional de Geología y Minas instaló un acelerómetro Kinematic SMA-1 en las instalaciones del acueducto de la ciudad en el sector de la Enea.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Seccional Manizales



Finalmente, como parte de un proyecto de investigación en curso por parte del autor en la Universidad Nacional en Manizales, se logró con el apoyo de El Fondo Nacional de Calamidades y la Oficina de Atención de Desastres del Gobierno Nacional, la consecución de tres acelerómetros Kinometrics SSA-1 de registro digital, que fueron instalados en 1991. Uno de los equipos ha sido instalado en el edificio de la Carrera de Arquitectura en El Cable, debido a la presencia allí de una explanación hidráulica, y a la aguda expresión topográfica del sitio. El segundo se encuentra instalado en el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad, en un terreno de tipo limo-arenoso, y el tercero ha sido destinado hasta el momento a trabajos de campo, y actualmente se encuentra instalado en un sector de relleno hidráulico.

Hasta el presente, dichos equipos han registrado un total de 25 eventos, de los cuales la mayoría son tremores de poca significación. En consecuencia, solamente los más importantes han sido incluidos en este trabajo.

La Tabla 1 presenta los datos relevantes de los sismos que se han utilizado en el presente estudio. De ellos, 5 corresponden al Banco del Comercio, 4 al Laboratorio de Hidráulica y 4 a El Cable, cada uno de estos últimos analizado en sus dos componentes horizontales. De esta manera el número total de registros utilizados en el estudio es de 21.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Seccional Manizales



TABLA 1.

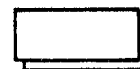
REGISTROS UTILIZADOS EN EL ANALISIS

SISMO (Epicentro)	FECHA	COMP.	ESTACION	#
Dabeiba (Ant.)	08-31-1977	NS	B. Comercio	1
Pereira (Ris.)	04-13-1975	NS	"	2
Versalles (Val.)	06-25-1980	NS	"	3
Umpala (Sant.)	03-22-1977	NS	"	4
La Tebaida (Quin.)	05-18-1976	EW	"	5
Belalcazar (Cds.)	08-15-1992	NS	Fac. Arq.	6
"	08-15-1992	EW	"	6
Murindo (Ant.)	10-17-1992	NS	"	7
"	10-17-1992	EW	"	7
"	10-18-1992	NS	"	8
"	10-18-1992	EW	"	8
"	10-18-1992	NS	"	9
"	10-18-1992	EW	"	9
Belalcazar (Cds.)	08-15-1992	NS	Lab. Hidr.	10
"	08-15-1992	EW	"	10
Murindo (Ant.)	10-17-1992	NS	"	11
"	10-17-1992	EW	"	11
"	10-18-1992	NS	"	12
"	10-18-1992	EW	"	12
"	10-18-1992	NS	"	13
"	10-18-1992	EW	"	13



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Seccional Manizales

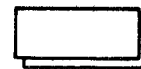


La Tabla 2 reúne la información sísmológica pertinente a los sismos utilizados para el análisis.

TABLA 2

PARAMETROS DE LOS REGISTROS

#	MAGNITUD	DISTANCIA EPICENTRAL	PROFUNDIDAD FOCAL
1	5.6	266	30
2	4.9	47	144
3	5.6	120	154
4	5.3	332	164
5	5.9	80	157
6	5.7	21	127
6	5.7	21	127
7	6.4	256	30
7	6.9	256	30
8	7.2	256	30
8	7.2	256	30
9	6.8	256	30
9	6.8	256	30
10	5.7	21	127
10	5.7	21	127
11	6.9	256	30
11	6.9	256	30
12	7.2	256	30
12	7.2	256	30
13	6.8	256	30
13	6.8	256	30



3.- Análisis de los espectros de respuesta

Una vez seleccionados los registros anteriores se procedió al cálculo de los espectros de aceleración de sistemas elásticos para un amortiguamiento del 5%.

También conviene destacar que los suelos correspondientes a los registros son típicos de la ciudad (limos arenosos y limos arcillosos, con profundidades entre 20 y 40 metros hasta el estrato de aglomerados de piroclastos), y se encuentran en la mayor parte de su casco urbano, lo cual hace que los resultados reportados aquí sean representativos y confiables para el diseño.

Con el fin de obtener una imagen adecuada del comportamiento de cada sitio, los espectros de cada uno fueron normalizados, dividiendo las ordenadas del espectro entre la aceleración máxima del suelo. Los principales resultados que cabe esperar de este análisis son:

- 1.- Los valores de amplificación de la aceleración del suelo en la respuesta de la estructura.
- 2.- Las zonas de períodos donde esta amplificación es máxima.

Como quiera que los espectros correspondientes a los registros del Banco del Comercio se encuentran publicados en las ref. 1 y 2, solamente se presentan aquí los pertinentes a los registros restantes, en las figuras 1 a 8. Puede verse la gran similitud de estos espectros en lo referente a la zona de máximas aceleraciones de respuesta, tanto para el sitio de El Cable como para el del Laboratorio de Hidráulica. Esto indica que, probablemente, la explanación hidráulica en el primero de los sitios no tiene mayor influencia en el comportamiento sísmico del mismo.

El resultado correspondiente a la amplificación de la aceleración del suelo en la respuesta de la estructura para el sitio Banco del Comercio se muestra en la figura 9, y para el sitio de la Facultad de Arquitectura en la figura 10. Algo similar al último se obtiene en el tercer sitio. Se observa claramente que, mientras se encuentra una gran dispersión de los resultados en el



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Seccional Manizales



caso del Banco del Comercio. La situación es la contraria en el caso de los otros dos sitios. La causa de esta diferencia es atribuible a posibles diferencias de los suelos de cada sitio, a pesar de la identidad de la formación geológica. Además, los siguientes hechos son de importancia en cuanto a los espectros bajo análisis:

a.- Para un sismo cercano y de poca duración como el No. 2, el espectro presenta una zona de máxima amplificación para períodos cortos.

b.- Para sismos más largos e intensos, la zona de amplificación máxima en este sitio se hace mayor. En el límite, se encuentra el espectro del registro No. 3, el cual presenta una forma casi plana entre 0.5 y 2.5 seg.

c.- En contraste, la zona de amplificación máxima de los espectros de los dos sitios restantes se encuentra entre 0.3 y 0.9 seg.

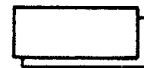
d.- En lo concerniente al valor de la amplificación de la aceleración del suelo en la respuesta de la estructura, puede notarse que se alcanzan valores en general superiores a 2.5, que es el valor de diseño del Código de Construcciones Sismoresistente.

Todo lo anterior indica claramente que la respuesta del suelo es más clara en el caso de los sitios orientales de la ciudad que en los occidentales. Al parecer, este último caso es el de un suelo más sensible a una amplia gama de frecuencias, pues como puede verse en la figura 7, presenta picos de resonancia en diferentes zonas frecuenciales, en dependencia de las frecuencias dominantes del sismo, de su incidencia y de su localización. Por otra parte, puede tratarse de un suelo de altas posibilidades de degradación de rigidez con la duración y la magnitud del sismo, tal como ilustra el espectro del registro No. 3, de duración 49 seg., o el del No. 1, de duración 32 seg. Un hecho que, en efecto, llama la atención es que el sismo de Versailles haya presentado una duración mucho mayor en este sitio que en la ciudad de Medellín (ref. 2), a pesar de encontrarse ésta más lejos del epicentro que Manizales, lo cual es contrario al esperado aumento de la duración con la distancia epicentral.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Seccional Manizales



Para corroborar esta hipótesis se calcularon los espectros de Fourier de dos registros largos en sitios diferentes: los correspondientes a los registros No. 3, en el sitio Banco del Comercio, y No. 10, en el Laboratorio de Hidráulica, normalizados para una aceleración máxima del 25% de la gravedad, debido a que el

espectro de Fourier revela de manera más clara las frecuencias dominantes del registro. La comparación se basa en el hecho de que ambos presentan semejanzas en cuanto a la aceleración pico registrada (22 y 34 cm/sec², respectivamente), a la distancia epicentral, y a la duración efectiva. Este último concepto corresponde al lapso de tiempo transcurrido entre el instante del sismo en el que se alcanzan el 5% y el 95% de la Intensidad del mismo.

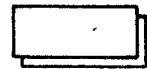
Al efectuar el análisis anterior se encontró que la duración efectiva del primer registro fue de 41.0 sec y del segundo 35.4 sec., valores que pueden considerarse cercanos.

La figura 11 muestra los espectros de Fourier de ambos registros normalizados. En ella se confirma que en el primer caso se da un almacenamiento de energía casi homogéneo para una amplísima gama de períodos, mientras que en el segundo, ésta sólo ocurre en la zona de períodos bajos.

El efecto de la duración del sismo es algo que, usualmente se ignora en el método de diseño basado en espectro de aceleración, debido a la relativa insensibilidad de éste a tal parámetro. La figura 12 muestra los espectros normalizados para una aceleración pico del suelo de 25% de la gravedad correspondientes a un sismo corto (No. 2) y uno largo (No. 3) en el mismo sitio. Independientemente del hecho de que la zona de aceleraciones máximas no coincide, sus valores máximos son semejantes.

Algo diferente sucede con el espectro de energía, definido como (ref 4):

$$V_e = \sqrt{\frac{2E}{M}}$$



donde E es la energía total almacenada en el sistema en la totalidad de la duración del sismo, y M es la masa del sistema.

El espectro de energía es, pues, una medida más adecuada para reflejar la influencia de la duración de un sismo en las estructuras, ya que las estructuras se encuentran sometidas a procesos complejos de degradación de rigidez y resistencia de sus diferentes elementos con el transcurso del sismo, incluso después de haber superado el momento de la máxima aceleración de respuesta. Por esta razón el efecto de la duración no queda claro en el espectro usual de aceleración, y solo puede ser comprendido haciendo un análisis de la energía almacenada en el sistema.

De hecho, esto queda claro en la figura 13, en la que se muestran los espectros de energía correspondientes a los dos casos anteriores. Se aprecia claramente que, a pesar de la igualdad de las aceleraciones del suelo y de respuesta, la energía almacenada en el caso del sismo más largo es varias veces superior a la del sismo corto, en casi toda la gama de períodos.

4.- Espectros de diseño propuestos

A pesar de que el espectro de energía es, a juicio del autor, una herramienta más útil y clara para el diseño que el de aceleración, no es viable el presentar aquí un espectro de energía recomendable para el diseño en la ciudad, debido a la abundante información sísmológica que se requiere para su definición correcta, y a la mayor familiaridad de la ingeniería colombiana con el espectro de aceleración.

A pesar de la diferencia de la forma del espectro en los registros del Banco del Comercio con los de los dos sitios restantes en la zona de períodos altos, se ha decidido proponer un solo espectro de diseño para ambas regiones, debido a la naturaleza geológica única de la formación (ref. 9) y con espesores muy similares. Se espera que con los futuros registros que se obtenga se podrá tener mayor claridad sobre las diferencias de comportamiento dinámico en las diferentes zonas de esta formación geológica.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Seccional Manizales



Para la estimación del espectro de diseño se siguió la metodología desarrollada por Seed y otros (ref 5), que a su vez sirvió de base para las Normas ATC-3 (ref 6) y el Código Colombiano de Construcciones Sismoresistentes (ref 7). De acuerdo con ello, se calcularon los espectros promedios normalizados para 5% de amortiguamiento, y se trazó un espectro suavizado cercano al mismo, siguiendo el criterio de protección de los edificios altos seguido

expresado en los comentarios a las normas ATC-3. Esta recomendación consiste en que para un período de 2 seg. se tenga una aceleración propuesta más o menos un 50% mayor que la obtenida por el espectro promedio. Adicionalmente, se ha extendido la franja de máximas aceleraciones hasta el valor de un segundo, un poco más allá de lo que indica el espectro promedio, debido a la incertidumbre sobre degradación de rigidez y frecuencias dominantes del suelo en consideración, y se ha incrementado el criterio de protección de edificios altos, dado el comportamiento un tanto errático mostrado en los registros del Banco del Comercio.

En consecuencia, para suelos limosos de la ciudad, se propone el siguiente espectro de diseño:

$$S_1 = 3A_p I, T \leq 1.0$$

$$S_2 = \frac{3A_p I}{T}, T \geq 1.0$$

El espectro propuesto se muestra en la figuras 14, junto con los espectros promedio y el espectro correspondiente a las condiciones de suelo III del Código Colombiano. Es necesario anotar los siguientes hechos:

a.- El espectro propuesto coincide fielmente con el espectro promedio, con la salvedad hecha más arriba sobre la zona de períodos bajos.



b.- En cambio, el espectro propuesto por el Código Colombiano para el tipo de suelo más blando no coincide con el promedio en lo referente a la amplitud de la zona de períodos dominantes, lo cual lo hace inseguro en la franja de períodos bajos. En la zona de períodos altos se muestra confiable con respecto al promedio calculado, pero no con respecto a algunos registros de alta amplificación espectral en las zonas de períodos largos, en especial, con respecto a los Nos. 3 y 4.

5.- Conclusiones

De los anteriores análisis puede concluirse lo siguiente:

- 1.- Los suelos de la ciudad presentan características particulares de respuesta sísmica diferentes de las reportadas en la literatura del tema, que obligan a la instrumentación intensa de los mismos con el fin de definir con mayor precisión el panorama de riesgo sísmico de la ciudad.
- 2.- Es recomendable que el espectro propuesto, basado en registros obtenidos en la ciudad en los últimos años, sea utilizado como alternativa de diseño ante los propuestos por el Código Colombiano para suelos blandos. Con particular énfasis se hace esta recomendación para las zonas en las que éste último no parece confiable.
- 3.- En los suelos limo-arcillosos de la ciudad debe tenerse especial precaución en el diseño y el detallado de las construcciones altas, debido a la alta sensibilidad mostrada por estos suelos ante la duración, el contenido frecuencial y otros valores de los sismos.

REFERENCIAS

- 1.- Hurtado, J. E., Prieto, S. D., Hincapié, J. F.: "Estudios para recuperación post sísmica de la Universidad de Caldas". IV Jornadas Estructurales de la Ingeniería Colombiana. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Bogotá, 1981.

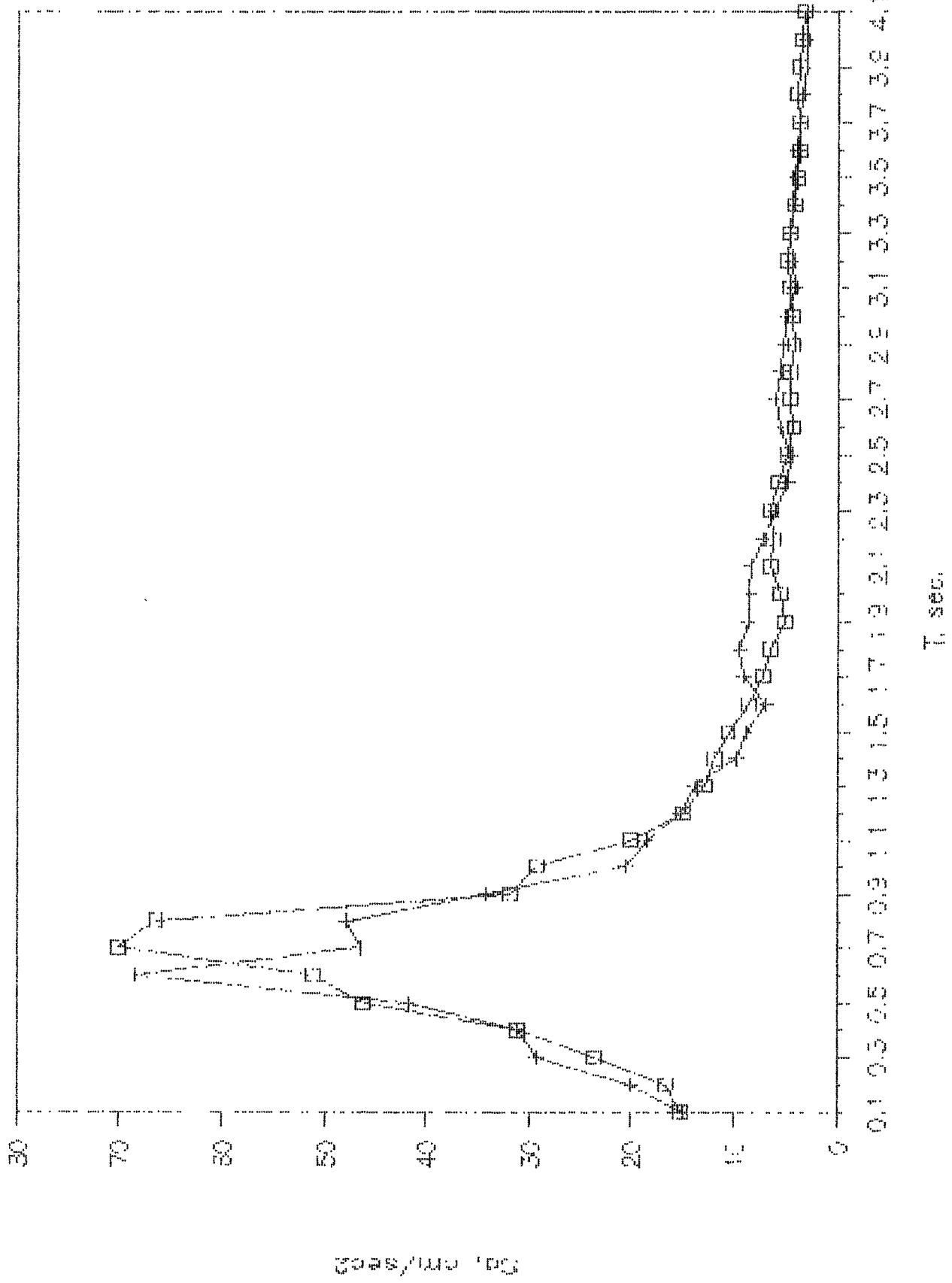


UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
Seccional Manizales

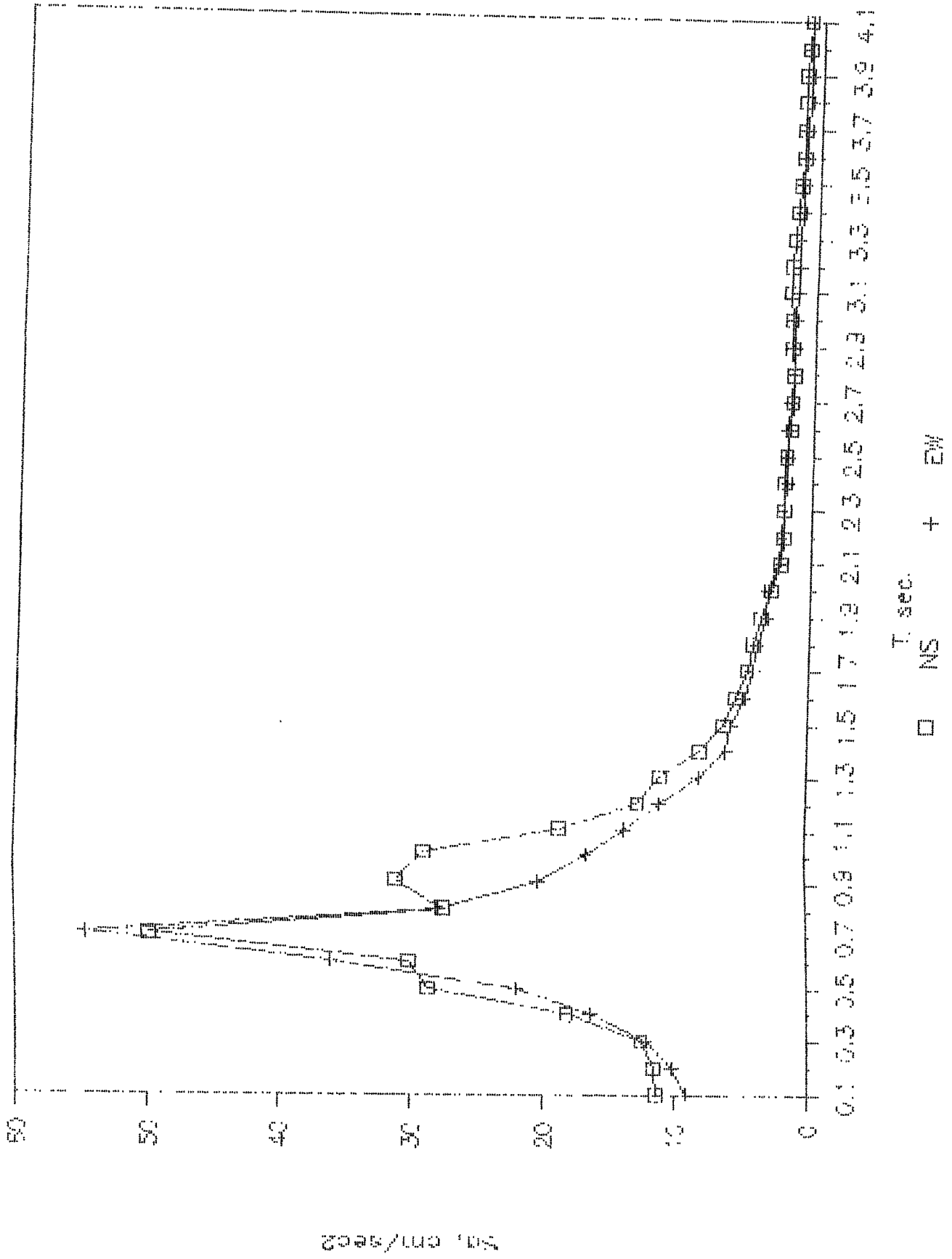


- 2.- Córdoba, S.L., Gomez, H. D.: "Acelerogramas, espectros de respuesta y variaciones temporales de las frecuencias de vibración de sismos colombianos". Tesis de Grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, 1987.
- 3.- Sarria, A.: "Ingeniería Sísmica". Ed. UNIandes. Bogotá, 1990.
- 4.- Akiyama, H.: "Design Energy Spectra for Specific Ground Conditions". Proceedings, INTERNATIONAL Workshop on Recent Developments in Base Isolation Techniques for Buildings. Tokio, 1992.
- 5.- Seed, H. B., Ugas, C., Lysmer, J. : "Site-dependent spectra for earthquake-resistant design.". Report EERC 74-12. Berkeley, 1974.
- 6.- Applied Technology Council: "Disposiciones tentativas para desarrollar códigos Sísmicos para edificios." Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Bogotá, 1976.
- 7.- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica: "Codigo Colombiano de Construcciones Sismoresistentes. Comentarios, Manuales y Especificaciones." Bogotá, 1991.
- 8.- Akiyama, H. : "Earthquake-Resistant Limit-State Design for Buildings." Tokio, 1985.
- 9.- Naranjo, J. L., Ríos, P. A., "Geología de Manizales y sus alrededores y su influencia en los riesgos geológicos". Revista Universidad de Caldas, Vol 10, Nos. 1-3. Manizales, 1989.
- 10.- Lomnitz, C., Rosenblueth, E. (eds): "Seismic Risk and Engineering Decisions". Amsterdam, 1976.

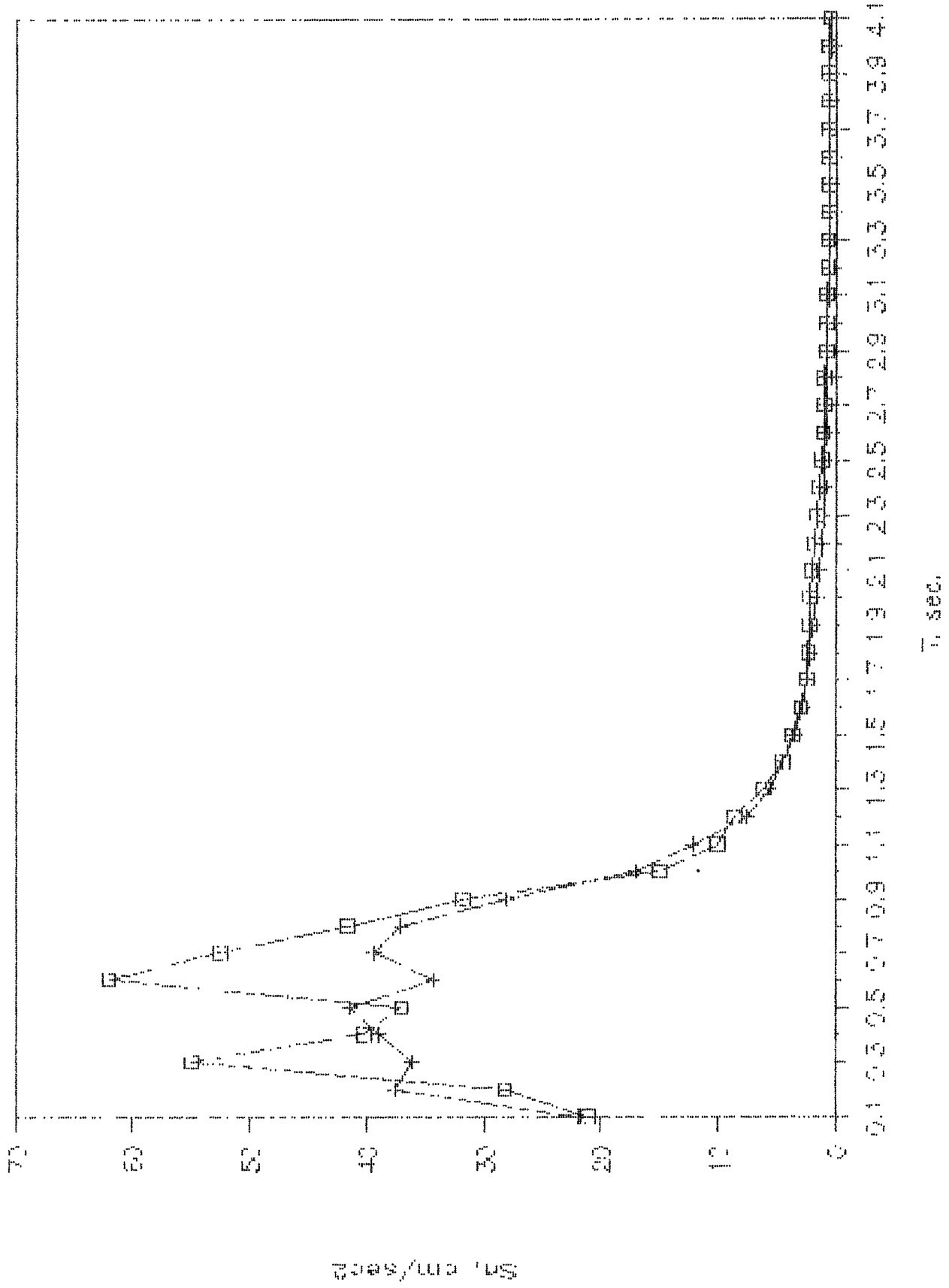
SISMO No. 8



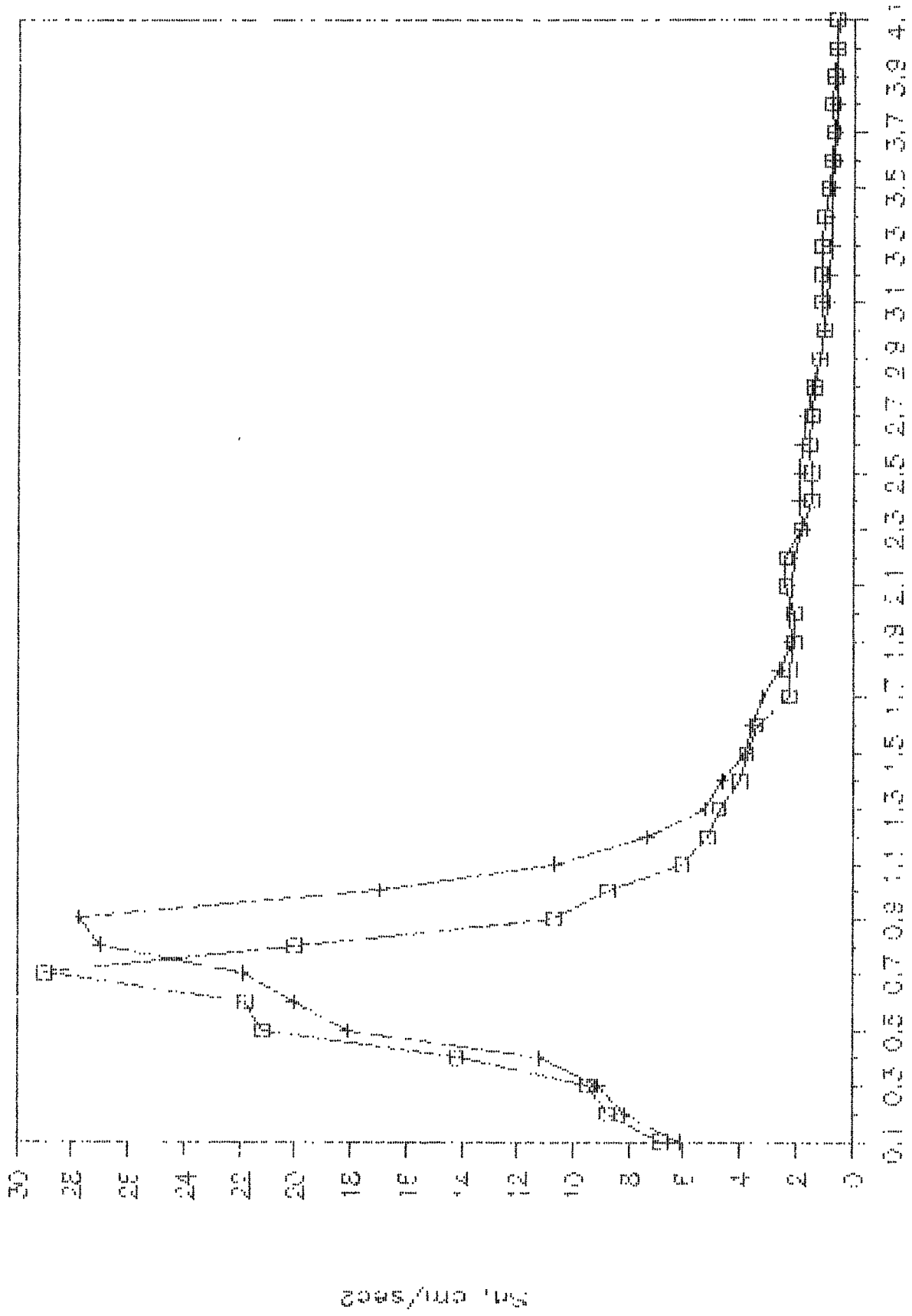
SISMO No. 9



SISMO No. 10

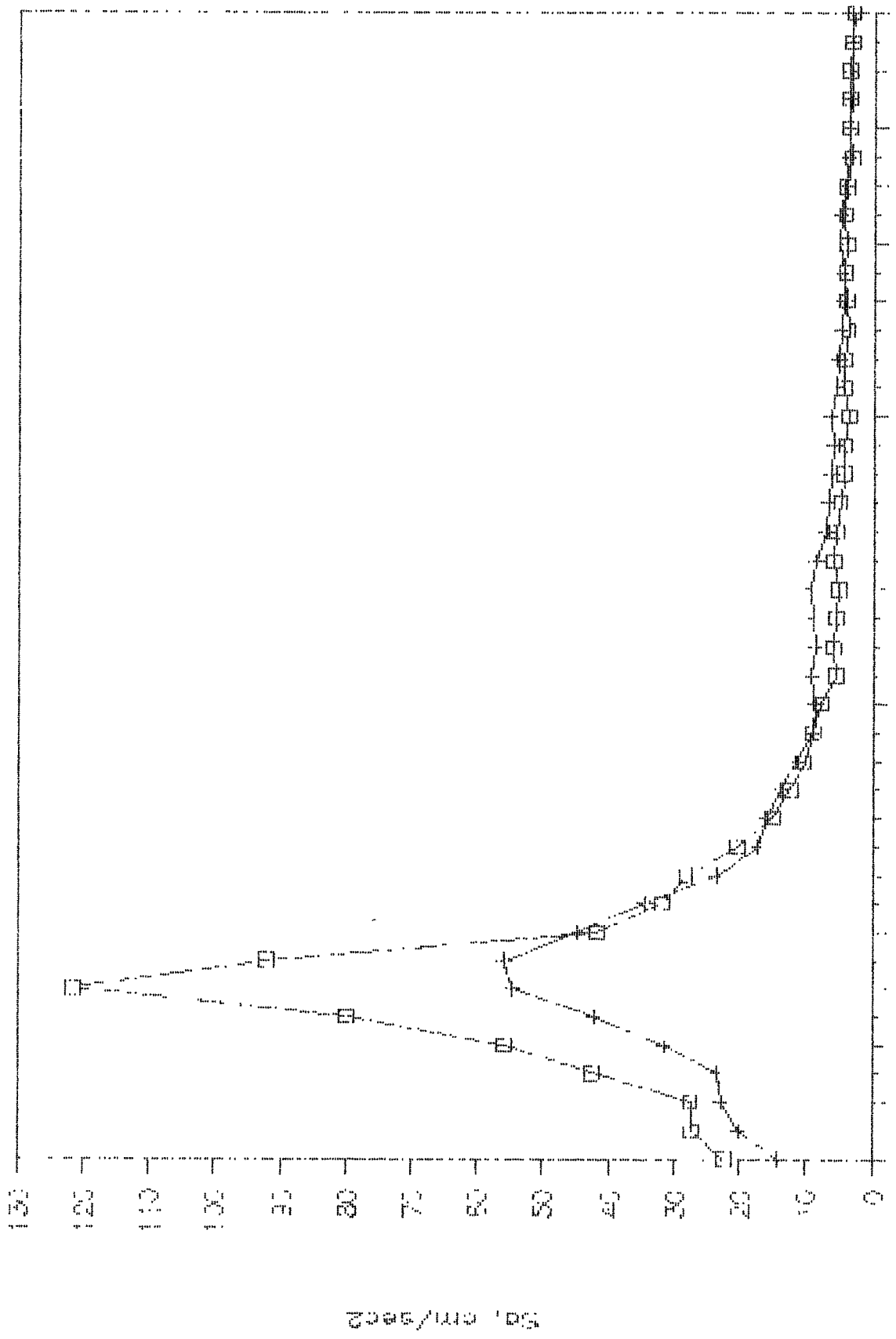


SISMO No. 11

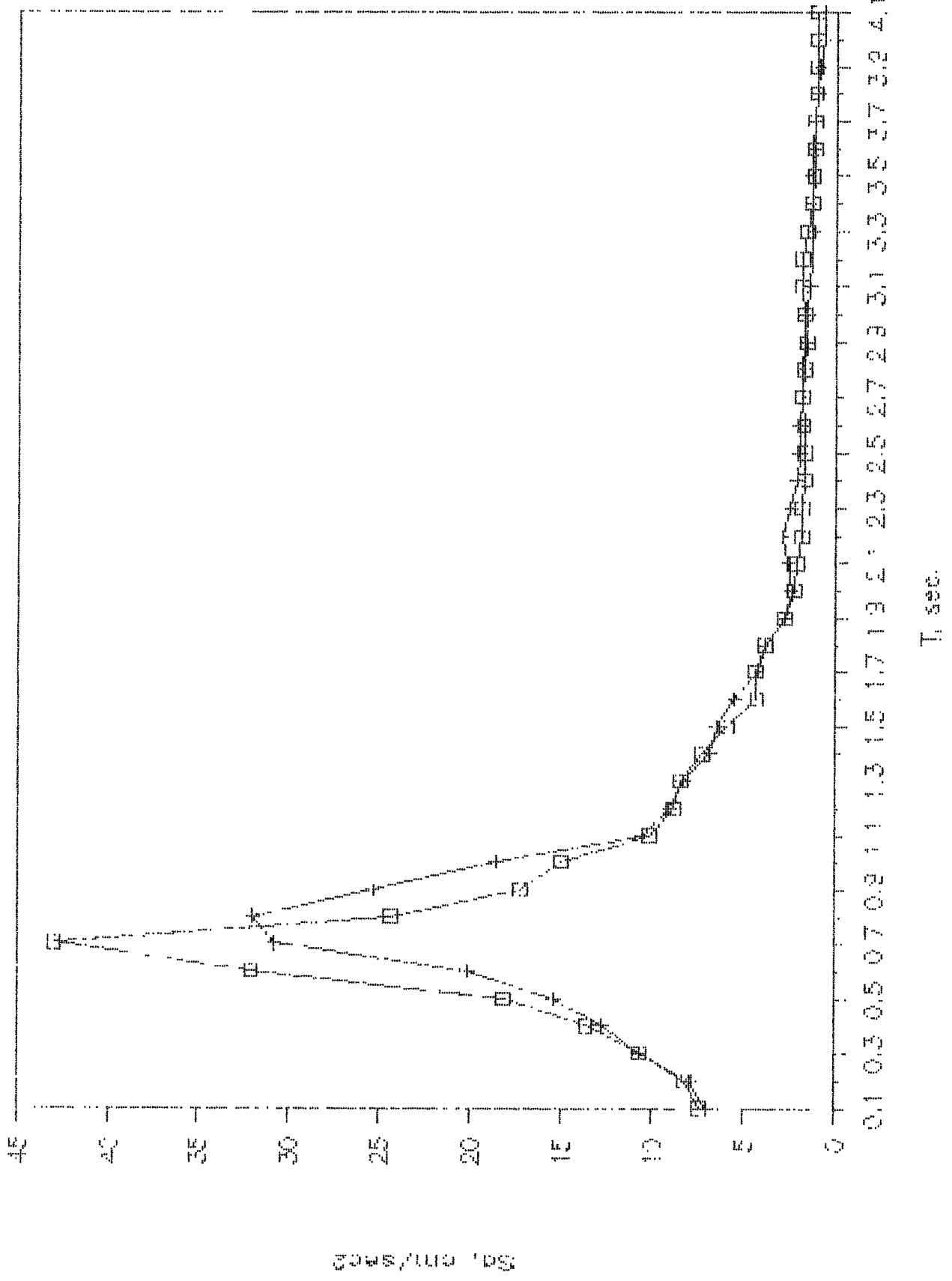


T, sec.

SISMO No. 12

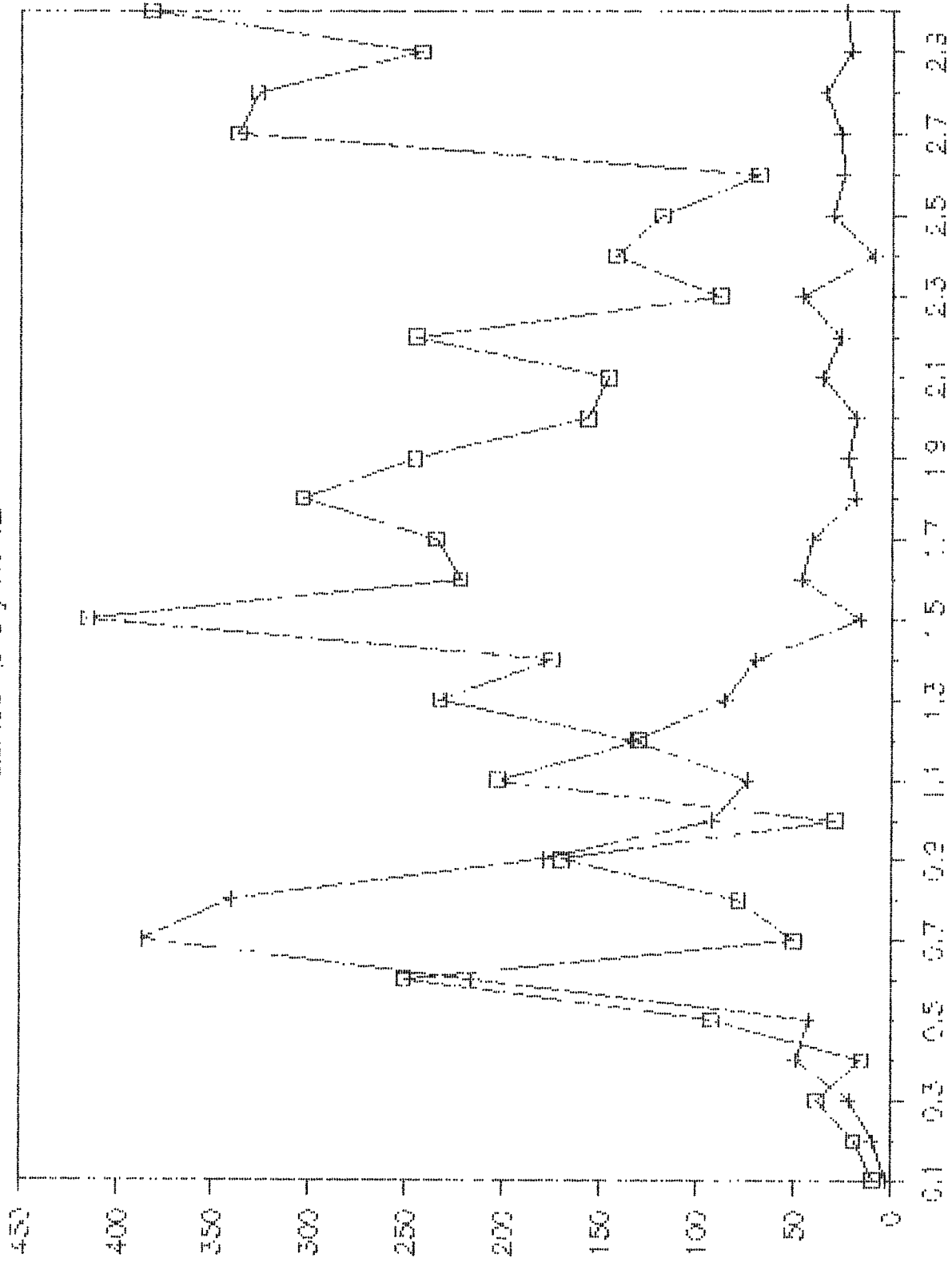


SISMO No. 13



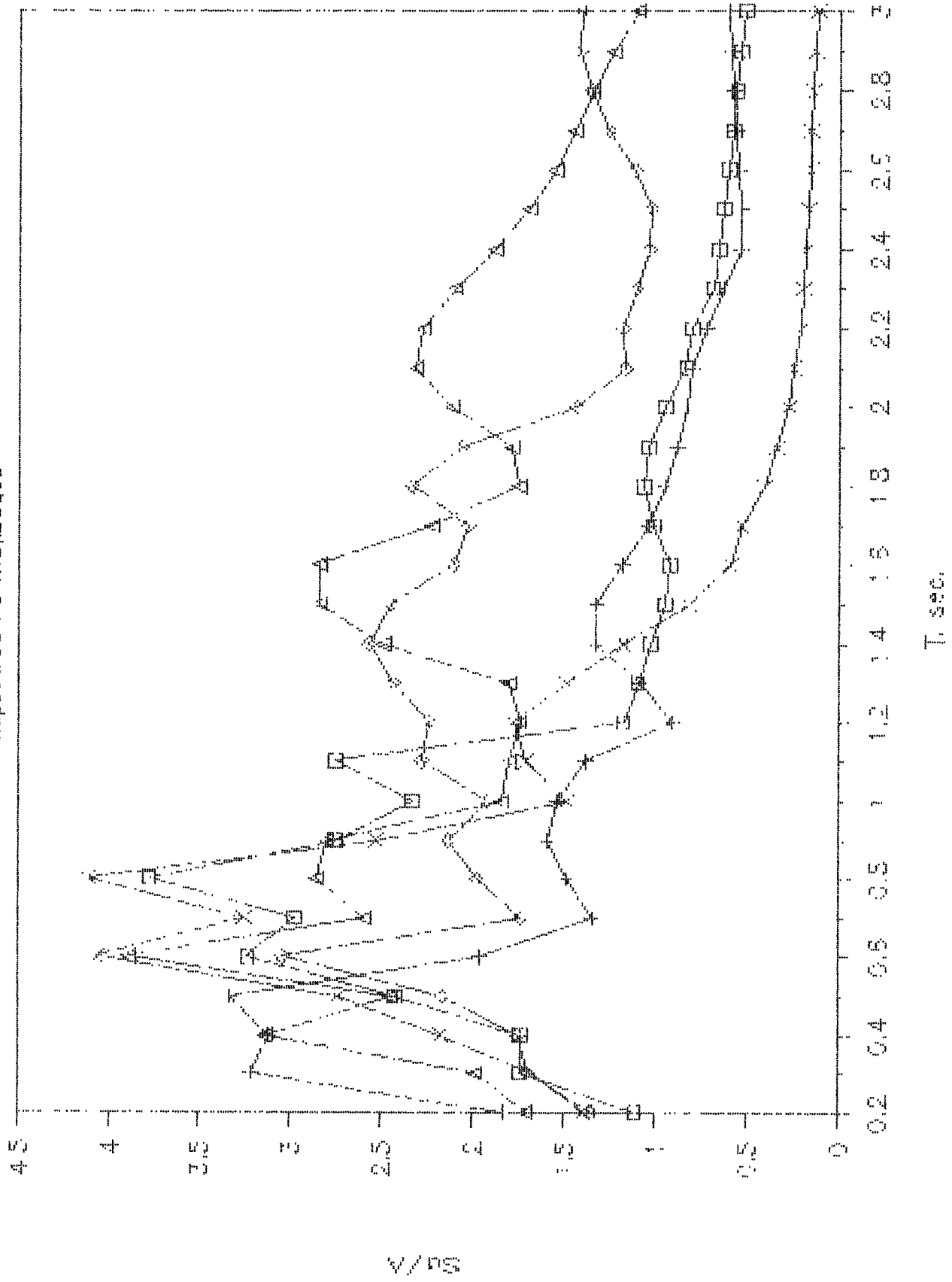
ESPECTROS DE FOURIER

SISTEMAS No 3 / No 12



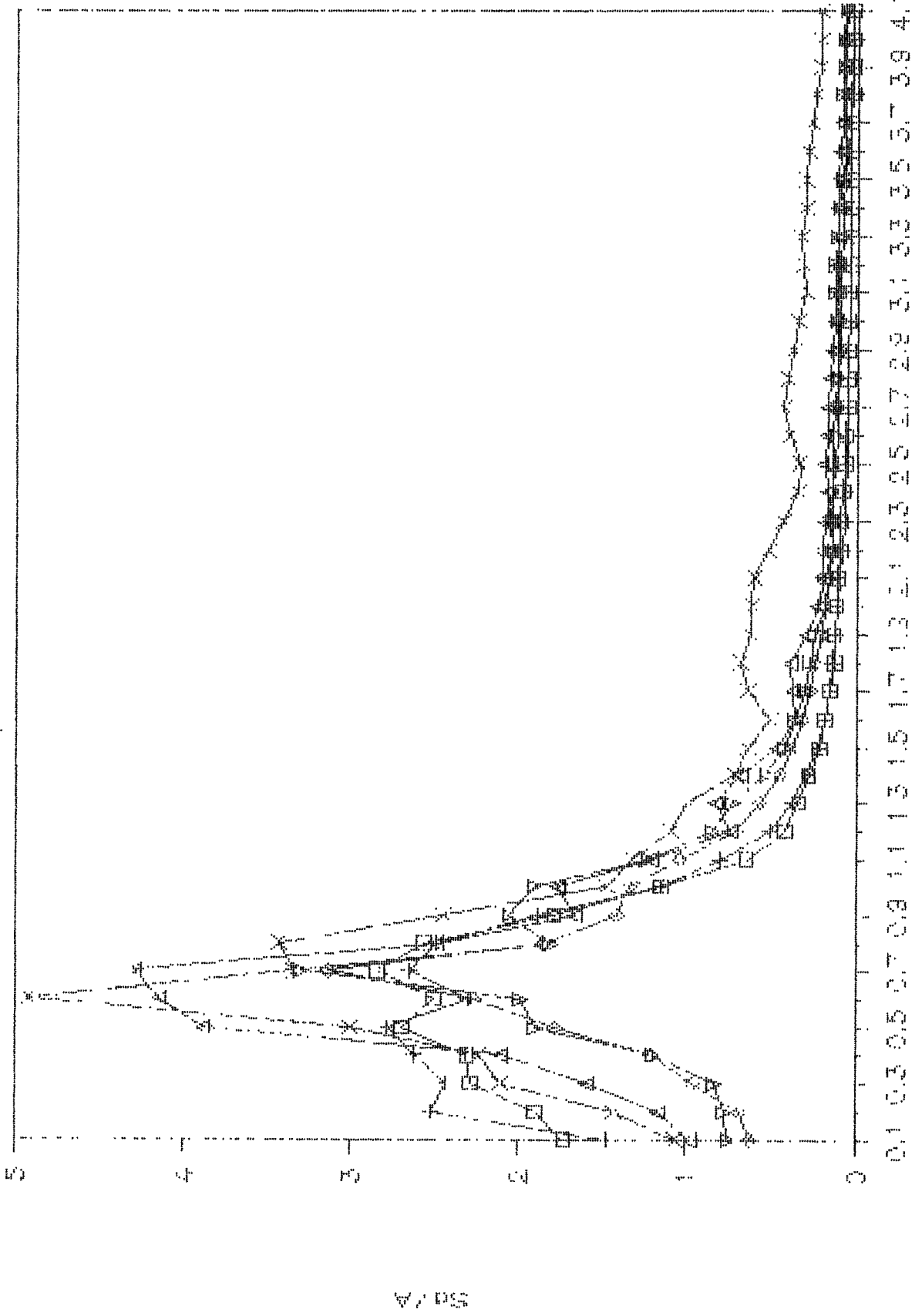
BANCO DEL COMERCIO

Espectros normalizados



FACULTAD DE ARQUITECTURA

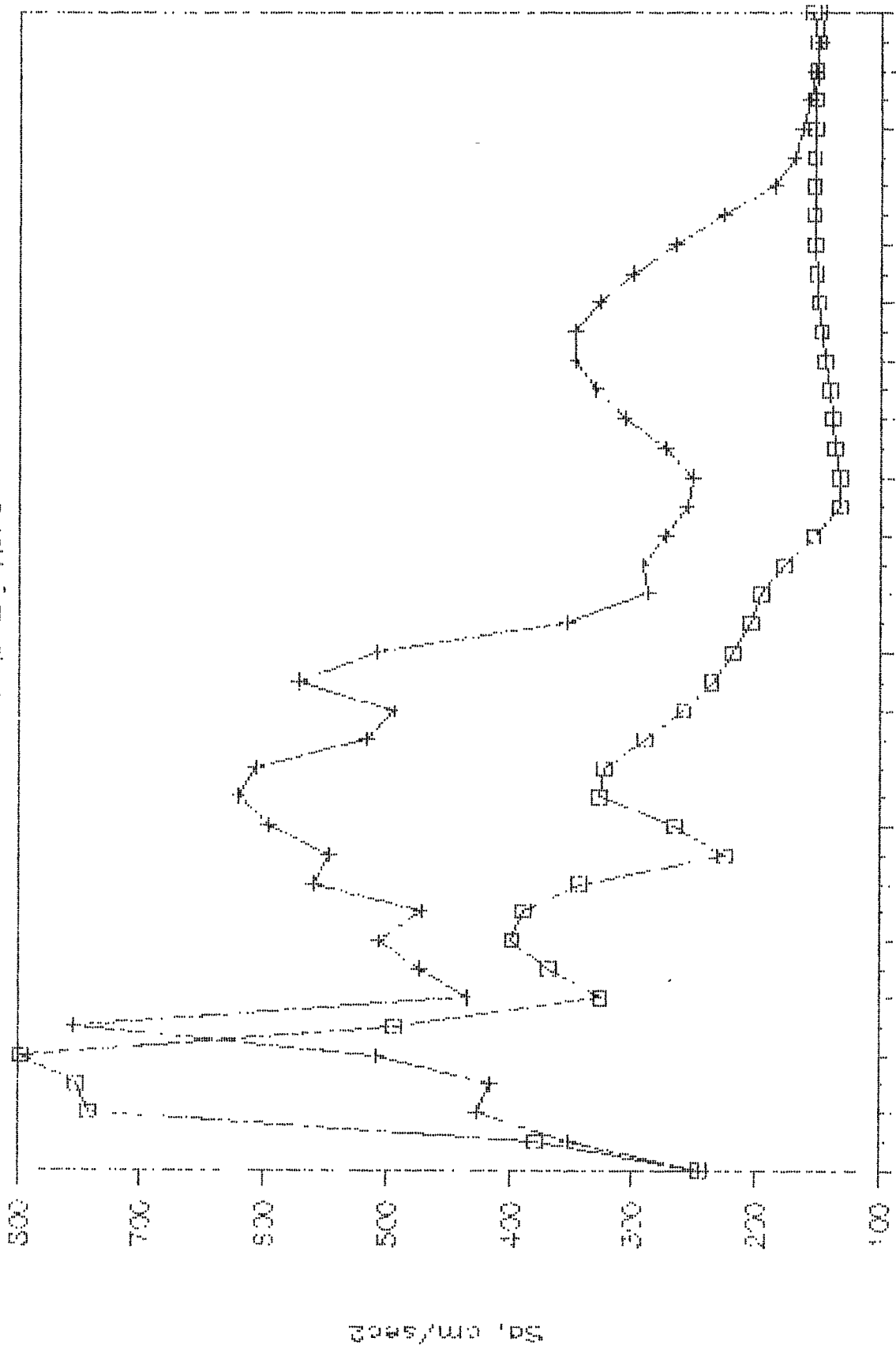
Espectros normalizados



T, sec.

$Sa, A=0.25g$

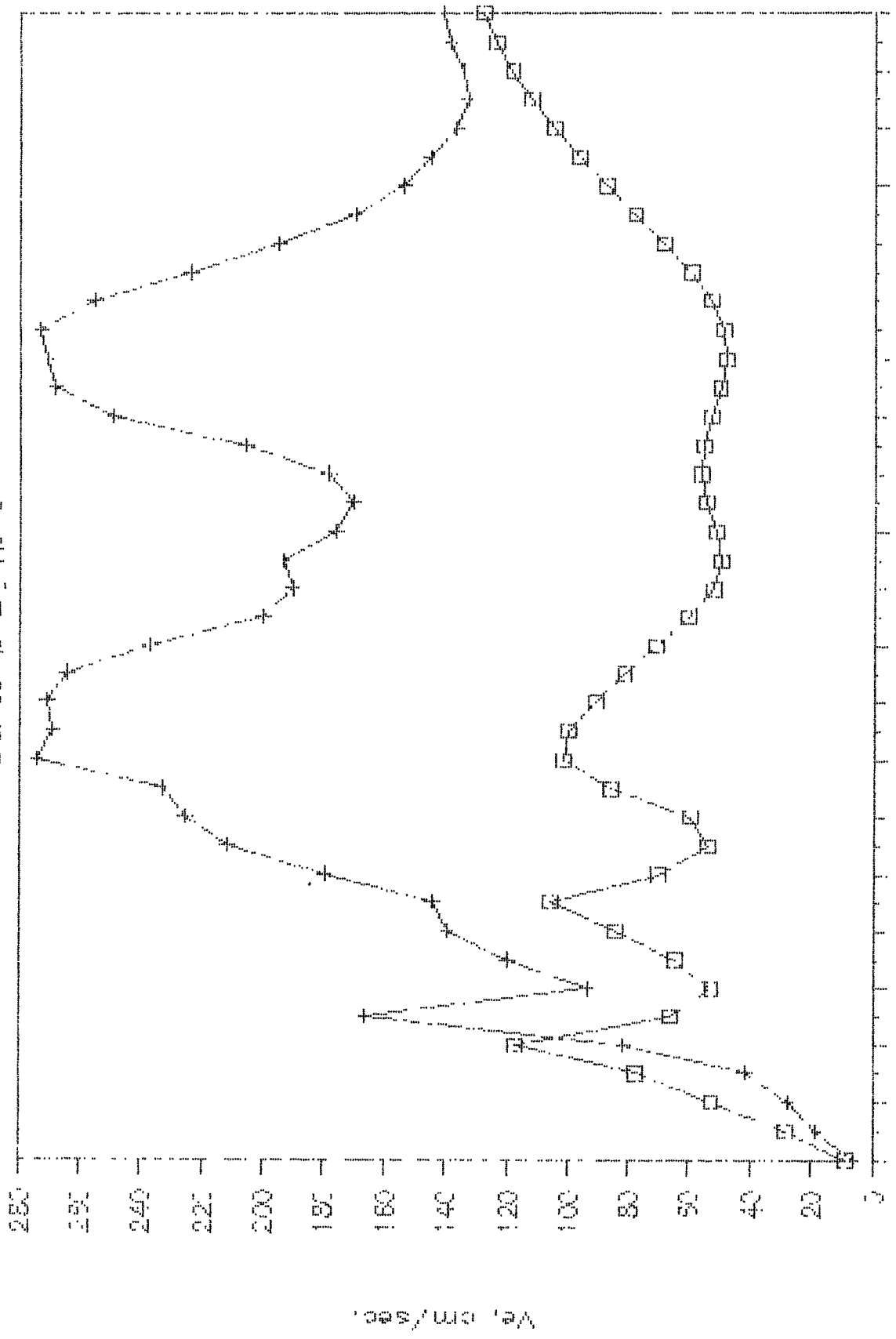
Sismos No. 2 y No. 3



T. sec.

$Ve, A=0.25g$

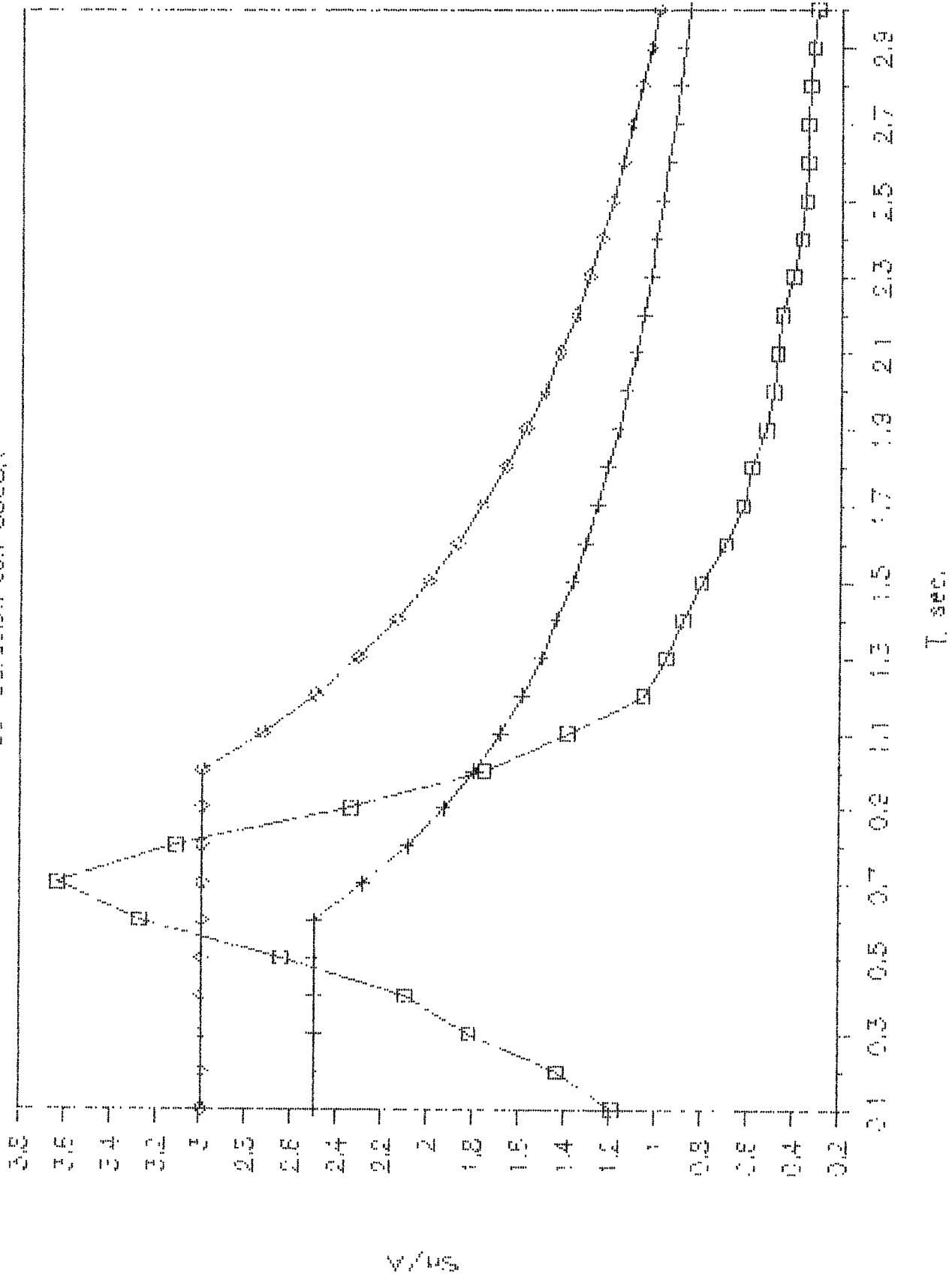
Sismos No 2 y No 3



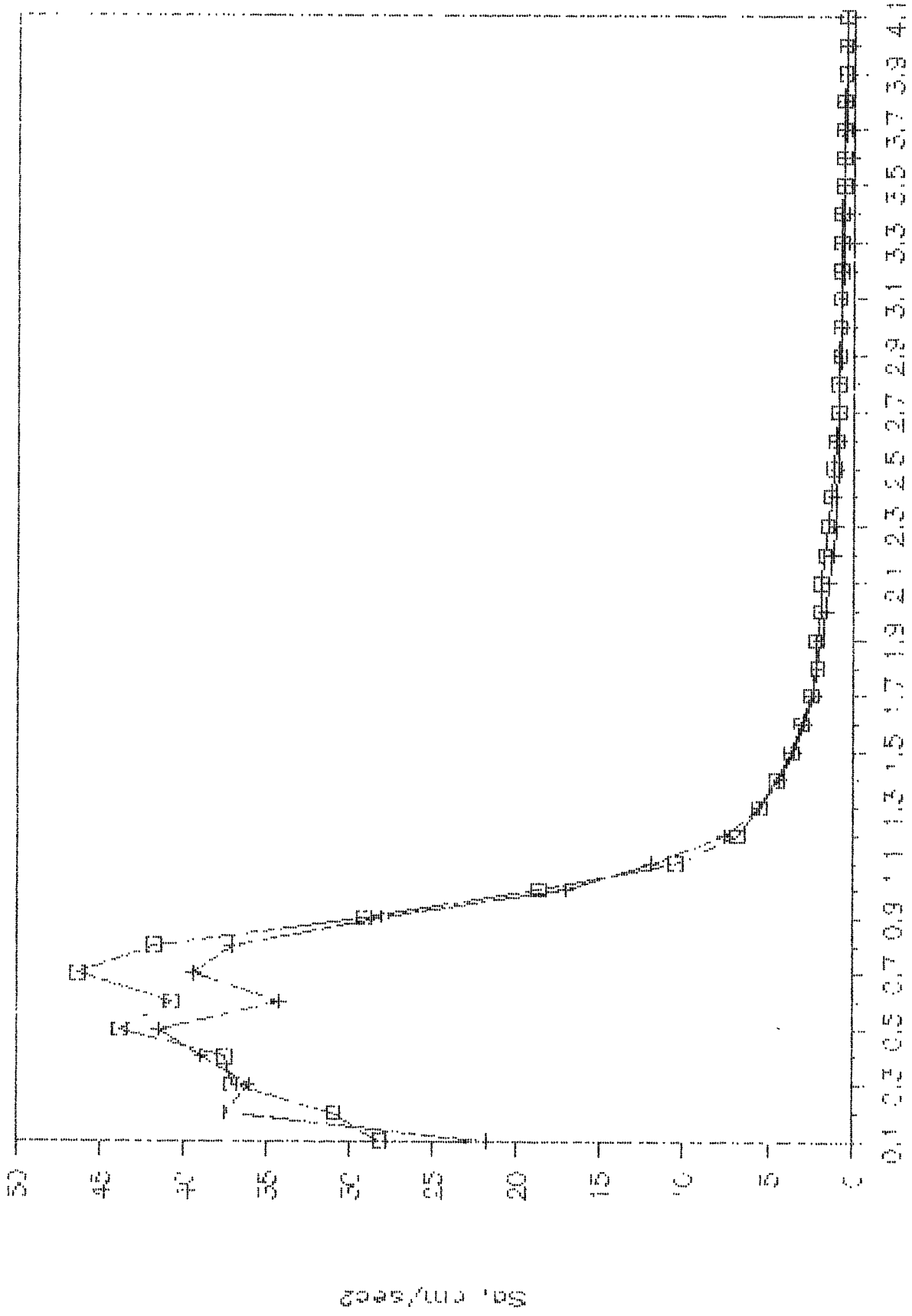
T, sec.

ESPECTRO PROPUESTO

Comparación con COCSR



SISMO No. 6



T. sec.

SISMO No. 7

