

EVALUACION DE DAÑOS EN RELACION CON LOS PARAMETROS DEL MOVIMIENTO PARA EL TERREMOTO DEL 10 DE OCTUBRE DE 1986 EN SAN SALVADOR

B. Benito¹, L. Cabañas¹ y A. Martínez-Pereira².

1. E.U.I.T. Topográfica. UPM.

2. Imperial College. London.

RESUMEN.

En este trabajo se examinan correlaciones entre parámetros del movimiento del suelo, obtenidos a partir de acelerogramas, y el grado de daño observado en estructuras de diferente resistencia. Se trata de determinar cuáles son los parámetros del movimiento que explican mejor el daño y en esta línea se ha examinado el comportamiento de la intensidad de Arias, la velocidad absoluta acumulativa (CAV), y la duración efectiva (DE). El estudio se ha realizado con datos correspondientes al terremoto de El Salvador 1986 y en la evaluación de vulnerabilidad y daños se han seguido los criterios de la escala EMS-92. Como resultado del estudio se infieren correlaciones que permiten establecer una medida del daño para diferentes niveles del movimiento del suelo y se determinan los parámetros que, tras el análisis realizado, pueden considerarse mejores estimadores del daño potencial.

1. INTRODUCCION

El presente trabajo está enmarcado en la línea de cuantificación y predicción del daño debido a acciones sísmicas en estructuras de diferente tipología. Un primer objetivo del estudio es la selección y estimación de parámetros indicativos de la energía del movimiento susceptible de dañar a las estructuras; parámetros que puedan sustituir o ser complementarios con las amplitudes pico (PGA y PGV) y que expliquen el daño observado. Como segundo objetivo, se tratará de encontrar relaciones entre el movimiento sísmico, representado a través de estos parámetros, y la respuesta de las estructuras, estimada a partir del daño.

En esta línea, el estudio analiza registros de movimiento fuerte correspondientes al terremoto ocurrido el 10 de Octubre de 1986 en San Salvador. Este terremoto, aunque de magnitud moderada, $M_s=5.4$, causó graves daños en la ciudad, por lo que existe información instrumental y macrosísmica de buena calidad.

Tras una revisión de los parámetros propuestos en la literatura, se han elegido como característicos del movimiento y representativos del daño la intensidad de Arias (1970), la velocidad absoluta acumulativa (CAV), definida por EPRI (1991) y la duración efectiva propuesta por Bommer y Martínez-Pereira (1997). Estos son los parámetros que se analizarán y cuya elección responde, fundamentalmente, a que reflejan los aspectos del movimiento que en nuestra opinión pueden explicar mejor el daño: energía, contenido espectral y duración.

Conviene advertir que se trata de un estudio preliminar, en el que dadas las limitaciones encontradas en la muestra de observaciones, no se pretende alcanzar resultados concluyentes, sino más bien proponer una línea de actuación encaminada al estudio de los daños en relación con el movimiento fuerte.

2. METODOLOGIA DE ESTUDIO

El procedimiento seguido en el estudio, para analizar el comportamiento de los parámetros anteriores, abarca las siguientes fases:

- Composición de la muestra de observaciones (edificios en los que se disponga de información sobre su tipología y daño) y asignación de clase de vulnerabilidad y grado de daño a cada edificio, eligiendo una escala adecuada.
- Selección de registros en estaciones próximas a los edificios, tratando de asegurar que los asentamientos de ámbos correspondan a similares condiciones geomorfológicas.
- Estimación de los parámetros del movimiento elegidos.
- Estudio de correlaciones movimiento-daño, mediante análisis de regresión de los datos correspondientes.

2.1 Muestra de observaciones y asignacion de vulnerabilidad y grado de daño

La información de los edificios ha sido extraída de la literatura y se han considerado, para componer la muestra de observaciones, aquellos edificios de los que se tienen descripciones tanto de detalles constructivos como de daños causados en elementos estructurales y no estructurales. Casi toda la información disponible se refiere a edificios de hormigón armado, por lo que el análisis se ha centrado en este tipo particular de construcción. Entre las principales fuentes de información cabe citar los trabajos de Anderson (1987), Lara (1987) y Sauter (1987). Tras el examen detallado de la correspondiente documentación se ha procedido a la asignación de vulnerabilidad y grado de daño, para lo que es importante elegir una escala adecuada a las características de la muestra, que en nuestro caso esta compuesta por 33 edificios.

Nuestra intención inicial era adoptar los criterios de la escala MSK, pero ésta presentaba algunos inconvenientes como, por ejemplo, no contemplar el posible diseño antisísmico. Hay que destacar que algunos de los edificios de los que se tiene información, construidos a partir de 1970, tienen algún grado de diseño sismorresistente. También conviene mencionar que parte de las construcciones habían sufrido daños en terremotos anteriores (como los de 1965 y 1982), lo que debe tenerse en cuenta en la asignación de vulnerabilidad. Con todo ello, ha resultado más adecuada para el estudio la escala europea EMS-92 ya que, además de contemplar los aspectos anteriores, es más flexible en la asignación de vulnerabilidad y daño y permite ciertos márgenes en la asignación. Esta se realiza atendiendo no solo al diseño, sino también a la calidad de la ejecución y al estado actual de los edificios. Una cuestión relevante de la escala EMS-92, en el contexto de nuestro estudio, es la definición de 6 clases de vulnerabilidad. A diferencia de la escala MSK, que incluye todas las estructuras de hormigón armado en una única clase C, sin tener en cuenta el diseño, la escala Europea desglosa 4 clases para estas estructuras: C, D E y F. La tipología C se reserva para edificios de hormigón sin diseño sismorresistente, mientras que las tres clases restantes corresponden a diseño sísmico ligero, moderado y fuerte, respectivamente. Por otra parte, la asignación de daños para edificios de hormigón se realiza teniendo en cuenta la proporción de daño en elementos estructurales y no estructurales., estableciéndose 5 grados de daño, desde ligero a colapso total.

Estos han sido los criterios seguidos en nuestro caso, añadiendo así un nuevo objetivo al estudio: examinar el comportamiento de la escala EMS-92 y valorar su idoneidad para este tipo de trabajos. Con estos criterios los 33 edificios que componen la muestra de observaciones resultan agrupados en las clases de vulnerabilidad C y D. La Figura 1 contiene un mapa con los emplazamientos de las estructuras, indicando la vulnerabilidad y el grado de daño.

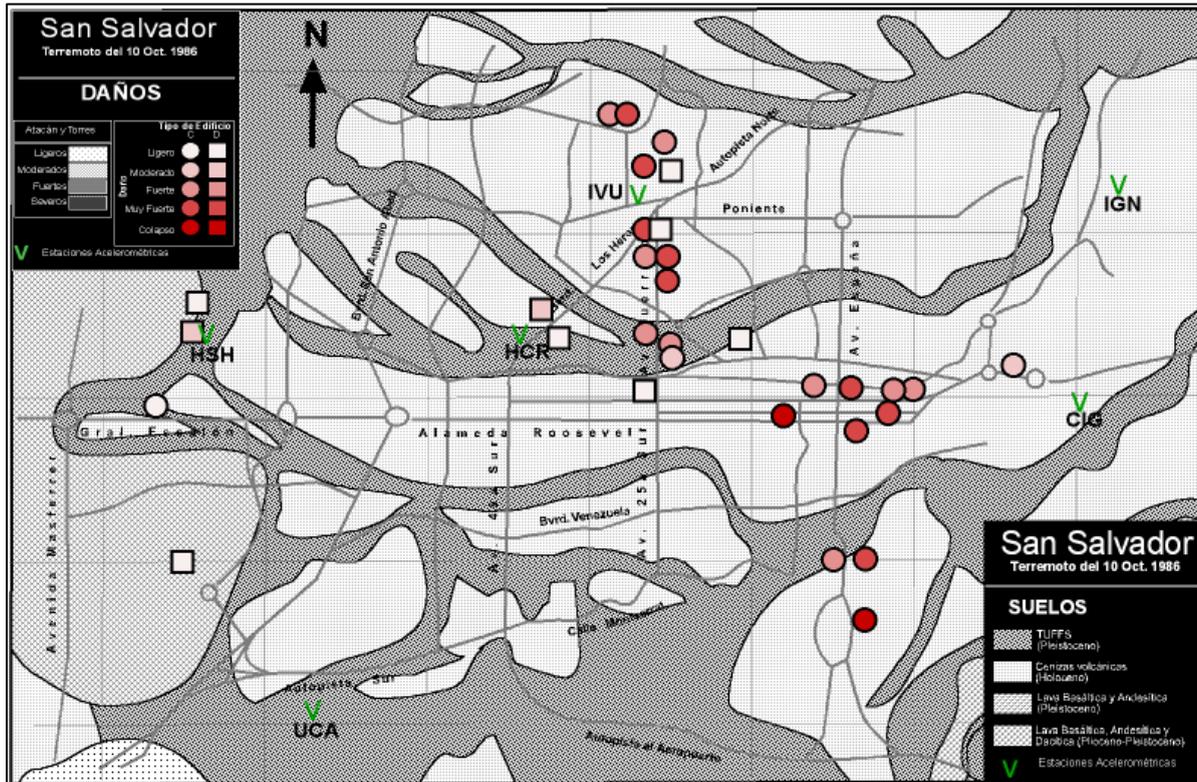


Figura 1.-Mapa generalizado de suelos en San Salvador (a partir del estudio de Atakan y Torres 1993, 1997), con ubicación de los edificios analizados y estaciones acelerométricas.

2.2 Características del movimiento y acelerogramas registrados

El terremoto objeto del estudio, ocurrido el 10 de octubre de 1986, fue un terremoto de cadena volcánica, cuyo epicentro fue localizado al sur de San Salvador con foco superficial, de profundidad menor que 8 km. Este terremoto, de magnitud moderada, $M_s = 5.4$, se registró en la ciudad con una energía similar a la del sismo de subducción ocurrido en la costa de El Salvador el 19 de junio de 1982, con magnitud $M_s = 7.3$ Sin embargo este último tuvo una duración de algo más de 30 segundos y causó daños mucho menores que el primero, lo que resulta relevante en el contexto del presente trabajo. El movimiento fuerte del sismo de 1986, que fue registrado en 6 estaciones acelerométricas distribuidas por la ciudad, no sobrepasó los 5 segundos en ninguna de las estaciones de registro. A pesar de su moderada magnitud, se registraron altas aceleraciones pico, que oscilaron entre 0.32 y 0.72 g para la componente horizontal en las diferentes estaciones. La componente vertical llegó a ser importante en casi todos los registros, variando entre 0.15 y 0.46 g. Las localizaciones del epicentro y de las 6

estaciones de registro, todas ellas comprendidas en un radio de 8 km alrededor de aquel, se incluyen también en la Figura 1.

2.3 Variación de condiciones locales y asignación de registros en los emplazamientos de las estructuras

Los movimientos registrados varían notablemente de una zona a otra de la ciudad, hecho que puede explicarse por la variedad de suelos dentro del área metropolitana de San Salvador, y la consiguiente influencia de las condiciones locales en el movimiento. Este es un importante factor a tener en cuenta a la hora de estudiar distribución de daños, ya que éstos varían también en las diferentes zonas de la ciudad por la misma causa. A este respecto, una de las dificultades encontradas en el estudio ha sido la asignación del movimiento que pueda considerarse señal de entrada para cada edificio analizado, ya que tan solo se dispone de 6 registros en distintos puntos de la ciudad y no todos ellos están en la proximidad de las estructuras.

Para realizar dicha asignación hemos tenido en cuenta el tipo de suelo sobre el que se asientan, tanto las estaciones de registro, como los edificios. En la Figura 1 se muestran los emplazamientos de ambos, sobre un mapa generalizado de suelos extraído del estudio de Atakan y Torres (1993, 1997), donde pueden apreciarse las 4 clases principales que cubren la ciudad. Prácticamente todos los emplazamientos yacen sobre dos tipos de formación: arenas limosas y limos arenosos de origen volcánico, que son los depósitos más recientes conocidos como “tierra blanca” y “tobas color café”. Teniendo en cuenta lo anterior, la asignación de registro a cada edificio se ha realizado siguiendo un criterio combinado de proximidad de la correspondiente estación y afinidad de suelo.

2.4. Análisis de correlaciones movimiento – daño

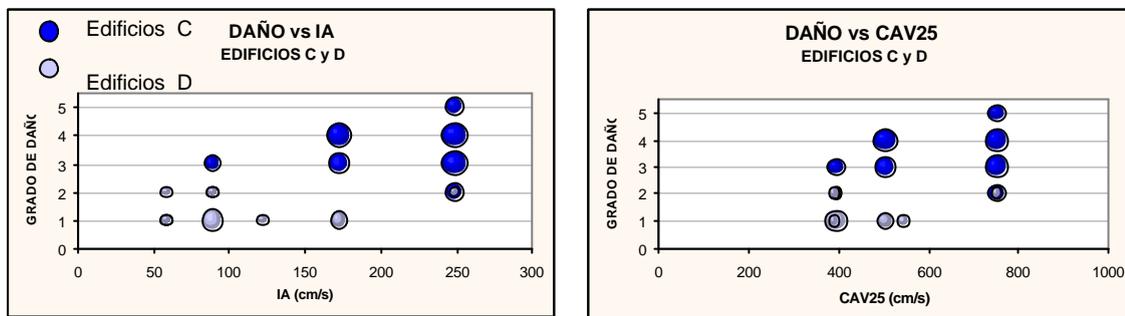
A partir de los datos procesados se ha comenzado el análisis de las correlaciones entre los distintos parámetros del movimiento del suelo y los grados de daño asignados para las dos clases de estructuras que intervienen en el estudio: C y D. Conviene indicar que todos los valores de los parámetros calculados proceden de cuatro registros, ya que tan solo ese número de estaciones se ha asociado a los emplazamientos del conjunto total de edificios. Esto hace que todas las observaciones de daño estén distribuidas en cuatro valores discretos del parámetro de movimiento, lo que en principio dificulta la obtención de buenas correlaciones. Se ha procedido entonces al análisis de éstas, tomando los parámetros de movimiento como variables independientes y el daño como variable dependiente, ya que es la que se trata de explicar en función del movimiento de entrada. Tras un primer estudio gráfico, se han buscado ajustes entre las variables por análisis de regresión, con los resultados que se indican en el siguiente apartado.

3. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

En la Figura 2 se muestra la distribución de dos de los parámetros incluidos en el análisis -IA, CAV- frente al daño observado, distinguiendo en la representación las clases de vulnerabilidad C y D a las que

pertenecen las estructuras. El tamaño del símbolo en cada gráfico es relativo al número de observaciones, algo que es necesario considerar dado que éstas se agrupan en torno a un número discreto de valores del parámetro del movimiento. El análisis de los gráficos permite establecer ciertas matizaciones. Un primer hecho destacable es que las estructuras de tipo D experimentan siempre menor daño para un mismo valor del parámetro que las de tipo C, algo que puede verse con las dos variables analizadas. Esto supone una constatación de que para la muestra estudiada, resulta adecuado separar las estructuras en dos clases de vulnerabilidad, además de la evidencia de que la clase D es menos vulnerable.

Sin embargo es importante resaltar la dispersión en el daño para valores altos de los parámetros analizados -IA y CAV-. Por otra parte, con la IA y el CAV vemos que existe una tendencia evidente a aumentar el daño a medida que aumenta el valor del parámetro, no pudiendo establecer lo mismo con la duración. La IA parece ser el parámetro que presenta mejor correlación, mientras que la duración por si



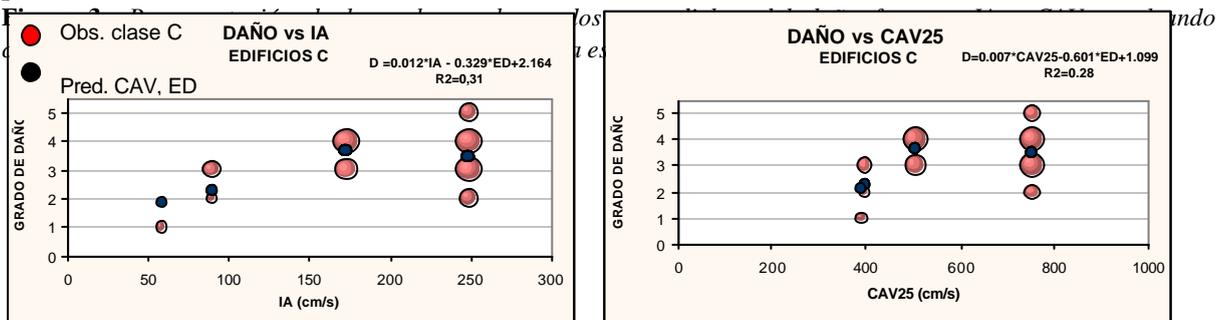
sola no explica el daño.

Figura 2.- Distribuciones de daño observado frente a IA y CAV, para las estructuras tipo C y D.

Conviene, sin embargo, hacer alguna puntualización a este respecto. Algunas observaciones de corta duración (2 s.) y daño fuerte (3 ó 4) coinciden con altos valores de los restantes parámetros. Además, la misma cantidad de energía con menor duración puede producir mayores daños, ya que supone mayor demanda de ductilidad en pocos ciclos de carga, impidiendo a la estructura disipar energía en forma inelástica. Todo ello induce a pensar que la duración pueda ser un parámetro complementario a los demás, a la hora de explicar el daño y debe ser introducido en

Con esta idea se ha procedido a analizar la bondad de los ajustes, efectuando en primer lugar regresiones de cada parámetro con el daño de forma independiente. Después se han estimado correlaciones multilineales, combinando cada parámetro con la duración.

Aunque ninguna de las correlaciones es aceptable como modelo de predicción, dados los bajos valores del coeficiente R^2 encontrados, la interpretación cualitativa de los resultados permite establecer algunos puntos de interés.



Con todos los parámetros se observa una mejora en la correlación bilineal, al introducir la duración como variable regresora lo que parece evidenciar la contribución de la duración en la explicación del daño, también desde un punto de vista matemático. En la Figura 3 se muestran, para la clase C, las distribuciones de daños observados frente a la IA y el CAV, junto con los valores predichos que resultan de las correlaciones bilineales, al incluir la duración efectiva (DE).

4. CONCLUSIONES

Aunque los resultados del estudio deben interpretarse con precaución, debido a las limitaciones inherentes a la información disponible es posible extraer una serie de conclusiones, que se resumen a continuación:

- La escala europea EMS-92, ha resultado de utilidad para separar estructuras en clases de vulnerabilidad atendiendo a su diferente comportamiento sísmico y considerando no solo el diseño, sino también la calidad de ejecución y el estado actual de los edificios (posiblemente dañados en terremotos anteriores), lo que avala su idoneidad en estudios como el realizado.
- En las correlaciones analizadas se observa un incremento gradual del daño al aumentar cualquiera de los parámetros examinados, exceptuando la duración. Las mejores correlaciones se tienen con la Intensidad de Arias.
- La duración por si sola no explica el daño, pero contribuye a mejorar las correlaciones con cualquiera de los demás parámetros.

Por último, de cara a futuros estudios en la misma línea, sería conveniente aumentar la fiabilidad en el análisis de correlaciones movimiento-daño, lo que requeriría muestras de observaciones más completas y disponibilidad de datos de movimiento en los mismos emplazamientos de las estructuras. Esto hace que sea recomendable, tras la ocurrencia de un terremoto, realizar inspecciones completas de daños en el entorno próximo a las estaciones de registro.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. J. Bommer y al Dr. K. Atakan la información facilitada sobre el terremoto estudiado y a M.A. Bernabé y J. Álvarez por su ayuda en la realización de mapas.

6. BIBLIOGRAFIA

- Arias, A. (1970). "A measure of earthquake intensity" in Seismic Design for Nuclear Power Plants (Ed. R.J. Hansen). MIT Press, Cambridge, MA, 1970, pp 438-469
- Anderson, R.W. (1987). "The San Salvador earthquake of October 10, 1986 -Review of Building Damage". Earthquake Spectra Vol. 3, pp 497-536.
- Atakan, K. y Torres, R. (1993), "Local Site Response in San Salvador based on the October 10, 1986 Earthquake." Report N° 1-06 under the project 'Reduction of Natural Disasters in Central America: Earthquake Preparedness and Hazard Mitigation'. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, Norway.
- Atakan, K. y Torres, R. (1997), "Local Site Effects on the October 10, 1986 Earthquake San Salvador, El Salvador." (Comunicación personal). Submitted to Geophys. J. Int.
- Bommer, J. and Martínez-Pereira, A. (1997). "The prediction of earthquake strong-motion duration". Submitted to The Journal of Earthquake Engineering.
- EPRI (1991) "Standardization of the cumulative absolute velocity", EPRI TR-100082 (Tier 1). Electrical Power Research Inst., Palo Alto, CA, 1991.

- European Seismological Commission ESC (1993). "*European Macroseismic Scale 1992 (up-dated MSK-scale)*" Conseil de L'Europe. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Vol. 7. Editor G. Grunthal. Luxembourg 1993.
- Lara, M.A. (1987). "*The San Salvador Earthquake of October 10, 1986- Detailed Evaluation of the Performance of Eight Engineered Structures.*" Earthquake Spectra Vol. 3, pp 543-562.
- Sauter, F. (1987). "*The San Salvador Earthquake of October 10, 1986- Structural Aspects of Damage.*" Earthquake Spectra Vol. 3, pp 563-584.