

**SISTEMA NACIONAL PARA LA PREVENCIÓN Y ATENCIÓN DE DESASTRES
SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS**

**SEMINARIO
DESASTRES SÍSMICOS EN GRANDES CIUDADES
"Enseñanzas en Mitigación y Operativos de Emergencia"**

**"MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD
Y EL RIESGO SÍSMICO"**

**INSTITUTO DE INGENIERÍA SÍSMICA Y SISMOLOGÍA
Jakić PETROVSKI
Profesor
Zoran MILUTINOVIC
Profesor Asociado
Universidad "Kiril and Metodij"
Skopje, Yugoslavia.**

MODELO PARA LA EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO SISMICO

Jakim PETROVSKI : Zoran MILUTINOVIC
Profesores
Instituto de Ingenieria Sismica y Sismologia,
Universidad "Kiril and Metodiј"
Skopje, Yugoslavia

RESUMEN

A continuación se presenta un modelo integrado de predicción para la evaluación a gran escala del daño sísmico regional/urbano basado en datos sismológicos e instrumentales, estudios regionales y locales y registros de daños provenientes de terremotos anteriores. Las predicciones de daños en edificios de Montenegro, bajos y altos, de mampostería y concreto reforzado, se logran definiendo las funciones de vulnerabilidad basándose en datos empíricos para 38,830 edificios (5.634,088m²), afectados por el terremoto de Montenegro (Yugoslavia) en 1979 y los datos del fuerte movimiento registrados del mismo terremoto. Se analizará y presentará un aspecto general a largo plazo de un programa regional de reducción de riesgo sísmico estudiando dos situaciones hipotéticas de utilización de terreno en el mismo ambiente sísmico, incluyendo igual zona bruta de construcción regional, comunal y de zonificación, variando únicamente la tipología de construcción adoptada.

INTRODUCCION

Aún cuando se han realizado significativos esfuerzos para la evaluación del peligro sísmico y la mitigación de sus posibles consecuencias, los grandes terremotos continúan causando enormes daños en la economía de las zonas afectadas y de países enteros. Sin embargo, se requiere una evaluación especializada y exhaustiva de los peligros naturales (y tecnológicos), incluyendo un riguroso enfoque científico, tecnológico e intelectual para solucionar el problema verdaderamente universal de proteger el desarrollo industrial ordenado y los patrones de urbanización que lo acompañan tales como inversión en infraestructura regional y local, líneas vitales, vivienda, aditamentos urbanos y además actividades públicas y sociales contra pérdidas en todas las etapas de su desarrollo.

Las recientes investigaciones y estudios han dado nuevas luces sobre los efectos de los desastres naturales en relación con la sociedad tecnológicamente organizada, indicando así mejores enfoques para ofrecer respuestas más apropiadas por parte de planificadores de política local y natural y demás autoridades involucradas.

DESCRIPCION DEL MODELO Y SUS RESULTADOS

Un modelo integrado de predicción a gran escala para la estimación de daños regionales/urbanos (1,2,3,4), Fig. 1, implica una serie de complejos procedimientos que requieren enfoques continuos y sistemáticos para la recopilación de datos, su análisis y presentación. Incorpora cuatro etapas básicas de procedimiento, las cuales deben realizarse en forma consistente en la siguiente secuencia:

- * Zonificación del área regional/urbana haciendo la debida identificación, inventario y mapeo de los elementos existentes que están en peligro. Metodología de Inventario.
- * Identificación de los aspectos de las condiciones del suelo en el sitio al modificar la magnitud del evento en un lugar dado anticipando los determinantes del movimiento telúrico en términos de espectros de respuesta efectiva (Seff). Metodología de Espectros de Respuesta Efectiva (2,3,5), Fig 2.
- * Evaluación de la vulnerabilidad de los elementos identificados bajo riesgo. Metodología de Predicción de Pérdidas (1, 2, 3, 4, 6, 7, 8), Fig. 3; y
- * Análisis de riesgo sísmico y optimización de pérdidas por movimientos sísmicos (físicos, funcionales y económicas) para ambientes actuales o mejorados de utilización de tierras (1,3).

La interacción espacial de estos factores determina el potencial de pérdidas regionales/urbanas de las situaciones de peligro sísmico adoptadas o de un solo terremoto ofreciéndole a los planificadores urbanos, a quienes elaboran políticas públicas y sociales, a los científicos, ingenieros y demás autoridades en cuestión:

1. Mapas de pérdidas específicas regionales/urbanas de elementos seleccionados en riesgo;
2. Mapas de distribución de daños regionales/urbanos para cada elemento en riesgo y mapas que se superponen ofreciendo información sobre la distribución del daño acumulado y concentraciones espaciales de daño para todos los elementos en riesgo;
3. Cifras acumuladas sobre pérdidas regionales/urbanas relacionadas con elementos en riesgo adoptados en la política de urbanización;
4. Estimativos sobre pérdidas físicas, funcionales y económicas totales que sufrirá una zona regional/urbana debido a un terremoto de magnitud predeterminada o situación de peligro sísmico justificado por el nivel de desarrollo económico;
5. Información sobre la conveniencia, aplicabilidad y necesidades de mejora de los estándares, reglamentaciones y códigos de construcción existentes.

EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD

Con el fin de anticipar los daños que puedan ocurrir durante futuros terremotos, es necesario conocer la forma en que diferentes tipos de estructuras (elementos en riesgo) se han comportado al estar expuestos a movimientos terrestres de diferentes intensidades, es decir desarrollar funciones de vulnerabilidad (V_f) para varios elementos en riesgo e incorporarlos a la metodología de predicción de pérdidas, Figura 3. Este estudio utiliza funciones de vulnerabilidad derivadas puramente en base empírica. Sin embargo, el modelo que se presenta (Figs. 1, 2 y 3) puede incorporar eficientemente cualquier conjunto de funciones de vulnerabilidad consistentemente desarrollado (teórico, empírico o experimental).

La Fig. 4 presenta el modelo VF aceptado (1,2,3,4,6) y desarrollado en base a datos obtenidos por la metodología uniforme de IZIIS para la inspección de edificios y la clasificación de daños y capacidad de ser utilizados (1,3,5) empleando un esquema de cinco calificaciones de daño y tres niveles de capacidad de ser utilizados. (Tabla I) para describir los daños inducidos por terremotos. Las tres curvas (denominadas I, II y III) se refieren a las funciones de vulnerabilidad física

definidas a través de las correspondientes relaciones de daño:

$$RD (\%) = 100 \text{ NBD}_i / \text{NB} \quad (\text{para } i = \text{I, II y III})$$

Donde NBD, es número de edificios donde tan solo se ha observado un ligero daño no estructural y prácticamente ningún daño estructural (utilizables, D/u-C-I); NBD_{II} es mínimo de edificios con daños no estructurales serios y daños estructurales moderados (Temporalmente inutilizables, D/u-C-II); NBD_{III} es número de edificios destruidos, donde "destruidos" significa colapso durante o inmediatamente después del terremoto o edificios averiados hasta el punto que no hay justificación económica ni técnica para repararlos y fortalecerlos (permanentemente inutilizables, D/u-C-III); y NB es el número total de edificios.

Para la derivación de las funciones de vulnerabilidad empíricas empleadas se utilizaron los espectros de respuesta efectiva (Seff, [2,,5]) desarrollados con base en los daños de Montenegro en 1979 y datos sobre fuertes movimientos. Los espectros de respuesta efectiva incorporan los efectos de: (1) intensidad del movimiento terrestre (PGA) y duración (Td), como parámetros de movimiento terrestre; (2) período natural fundamental del edificio (To) y amortiguación (h), como parámetros que describen las propiedades dinámicas de una estructura; y (3) ductilidad (ft) y cantidad de cambios de respuesta, como representantes del grupo de parámetros relacionados con capacidad estructural (sc). Para una condición dada del terreno en el sitio, los espectros de respuesta efectiva pueden aproximarse como [1,2]:

$$\text{Seff} = \text{Seff} (\text{M,A,s, Td, ft, h, To, sc})$$

Las Figuras 5 y 6 presentan algunos de los modelos de vulnerabilidad propuestos; se derivaron separadamente tanto para las categorías D (Daño), como U (capacidad de uso) (Tabla 1) considerando las condiciones del terreno en el sitio local de la ubicación del edificio. Un conjunto de datos sobre daños en 21,837 edificios (2.614,402m²), se ha utilizado para desarrollar los modelos de vulnerabilidad SM dependiendo del número de pisos del edificio y de su ubicación (Figura 5). (SM = edificio en piedra de uno a tres pisos).

Se consideraron conjuntos más pequeños de datos sobre daños para derivar los modelos BM (1.594 edificios con un área bruta total de 245.582m² y STM, Fig. 6 (STM = edificio en ladrillo de uno a tres pisos) 13.727 edificios con un área bruta total de 2.021922m²).

ESTIMACION Y MAPEO DE PERDIDAS REGIONALES

Se estudiaron dos formas urbanas que comprende las mismas áreas brutas regionales, comunales y zonales de construcción (Tabla 2), pero diferentes en tipología de construcción existente para determinar los niveles de peligro sísmico correspondientes a

periodos de retorno de 50 y 200 años (Ref. 2,8 y 10). En total se consideraron 4.164.150 m² de área bruta de construcción para las situaciones A y B de uso de tierra, de los cuales 1.890.900 m² asignados a la clase de construcción SM (Lu-S-A) se reubicaron en los tipos de construcción (Lu-S-B) BM (30%) y STM (70%).

Los resultados en términos de porcentaje de pérdidas durante periodos de retorno de 200 años con mapas superpuestos para los tipos de construcción SM, BM, STM y RCFS en LU-S-A y LU-S-B, respectivamente aparecen en las Figs. 7 y 8. Las cifras acumuladas sobre estimativos totales de pérdidas se calculan en la Tabla 3 para niveles de riesgo sísmico y periodos de retorno de 50 y 200 años.

CONCLUSIONES

El aporte específico del modelo a la planeación del uso de tierras en regiones expuestas a riesgo sísmico es una consideración y evaluación integral del peligro sísmico, la vulnerabilidad y el riesgo sísmico expresadas en términos de cifras acumuladas de pérdidas físicas y funcionales (Tabla 3) o mapeadas como pérdidas sísmicas acumuladas o parciales de los diferentes elementos en riesgo y en diferentes situaciones de uso de la tierra. (Figs. 7 y 8). Los márgenes de aplicación del modelo propuesto se demuestran analizando un aspecto general a largo plazo de un programa de reducción de riesgo causado por un terremoto en una región dada.

Se demostró que modificar y reemplazar el área bruta de construcción en piedra, altamente vulnerable, por ladrillo (30%) y mampostería reforzada (70%) (Lu-S-B, Tabla 2), disminuye las pérdidas físicas totales de 1.408.205m² a 518.145 m² (o en 63,2%, Tabla 3) y de 1.590.857m² a 700.885m² (o 55,9%) por niveles de riesgo sísmico relacionados con periodos específicos de retorno de 50 y 200 años respectivamente.

La metodología y resultados presentados ofrecen un enfoque racional para la creación de una política de urbanización, estimación de conveniencias, aplicabilidad y necesidades de mejoramiento de los estándares, reglamentaciones, códigos de construcción existentes, así como para la estimación del nivel existente o logrado de seguridad sísmica.

REFERENCIAS

- [1] Petrovski, J., Z. Milutinovic, et al., "Earthquake Damage Prediction Modelling for the Needs of Physical and Urban Planning", Report IZUS 84 084, Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje, Institute of

Town Planning and Design, Titograd, UNDRO, UNCHS, Skopje 1984.

- [2] Milutinovic, Z., " An Integrated Prediction Model for Estimation of Regional/Urban Seismic Damage", Ph.D. Thesis, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto, 1986.
- [3] Petrovsky, J. and Z. Milutinovic, "Development of Vulnerability Functions and Models for Assessment of Urban Seismic Risk", Institute of Earthquake Engineering and Engineering Seismology, Skopje, prepared for the Commission of the European Communities, Skopje, December 1987.
- [4] Milutinovic, Z., J. Petrovsky, and H. Kameda, "Integrated Modelling and Predictive Estimation of Urban/Rural Seismic Losses", 9 WCEE, Tokyo-Kyoto, 1988.
- [5] Milutinovic, Z. and H. Kameda, "Equivalent Ground Acceleration (EQA) as an Engineering Seismic Hazard Parameter - Development and Estimation" Research Report KUCE 83-85-01, School of Civil Engineering, Kyoto University, Kyoto, 1983.
- [6] Milutinovic, Z., J. Petrovski, and H. Kameda, "Earthquake Damage Prediction - Modelling and Assessment", 8ECEE, Lisbon, 1986.
- [7] Petrovski, J. et al., "Development of Empirical and Theoretical Vulnerability and Seismic Risk Models". 8WCEE, San Francisco, 1984.
- [8] Petrovski, J. and Z. Milutinovic, "Earthquake Vulnerability and Loss Assessment for Physical and Urban Planning". 8ECEE, Lisboa, 1986.

Table 1. Criteria for classification of damage and usability of buildings

Damage/ Usability Category	Usability Category	Damage State	Damage Category	Damage Description	Note
D/U-C-I	Usable	Slight nonstructural damage, very isolated or negligible structural damage	1	Without visible damage to the structural elements. Possible fine cracks in the wall and ceiling mortar. Hardly visible nonstructural and structural damage.	Buildings classified in damage category 1 and 2 are without decreased seismic capacity and do not pose danger to human life. Immediately usable or after removal of local hazard (cracked chimneys, attic or gable walls).
			2	Cracks to the wall and ceiling mortar. Falling of large patches of mortar from wall and ceiling surfaces. Considerable cracks, or partial failure of chimneys, attic and gable walls. Disturbance of partial sliding, sliding and falling down of roof covering. Cracks in structural members	
D/U-C-II	Temporarily unusable	Extensive nonstructural damage, considerable structural damage but yet repairable structural system	3	Disjunct or other cracks to structural walls, walls between windows and similar structural elements. Large cracks to reinforced concrete structural members : columns, beams, R.C. walls. Partially failed or failed chimneys, attic or gable walls. Disturbance, sliding and falling down of roof covering	Buildings classified in damage category 3 and 4 are with significantly decreased seismic capacity. Limited entry is permitted, unusable before repair and strengthening. Need for supporting and protection of the building and its surroundings should be considered
			4	Large cracks with or without detachment of walls with crushing of materials. Large cracks with crushed material of walls between windows and similar elements of structural walls. Large cracks with local dislocation of R.C. structural elements : columns, beams and R.C. walls. Slight dislocation of structural elements and the whole building.	
D/U-C-III	Unusable	Destroyed, partially or totally collapsed structural system	5	Structural members and their connections are extremely damaged and dislocated. A large number of crushed structural elements. Considerable displacements of the entire building and collapsing of roof structure. Partially or completely failed buildings	Buildings classified in category 5 are unsafe with possible sudden collapse. Entry is prohibited. Protection of streets and neighboring buildings or urgent demolition required. In case of isolated or typical buildings decision for demolition should be based on economical study for repair and strengthening

Table 2. LU-S-A and LU-S-B Communal/Regional Distribution of Considered Elements at Risk

Commune		Elements at Risk (Building Classes)						Total Gross Area Sq. m.
		SM Masonry		BM Masonry		STM Masonry		
		Gross Area Sq. m.	%	Gross Area Sq. m.	%	Gross Area Sq. m.	%	
Land-Use Scenario A	A	208,050	42	59,850	12	230,850	46	498,750
	B	472,650	57	103,500	13	244,950	30	821,100
	C	224,400	56	45,900	11	132,600	33	402,900
	D	315,000	38	78,750	10	437,850	52	831,600
	E	280,800	46	81,000	13	243,000	41	604,800
	F	390,000	39	101,250	10	513,750	51	1,005,000
	Total	1,890,900	45	470,250	11	1,803,000	44	4,164,150
Land-Use Scenario B	A	—	—	122,265	25	376,485	75	498,750
	B	—	—	145,295	30	575,805	70	821,100
	C	—	—	113,220	28	289,680	72	402,900
	D	—	—	173,250	21	658,350	77	831,600
	E	—	—	165,240	27	439,560	73	604,800
	F	—	—	218,250	22	788,750	78	1,005,000
	Total	—	—	1,037,520	25	3,128,630	75	4,164,150

Table 3. LU-S-A and LU-S-B Cumulative Total Losses (in %) Related to Seff Hazard Levels of 50 and 200 Years Return Period

Building Class		Total Gross Area Sq. m.	Total Losses (in%)					
			D/U-C-II		D/U-C-III		D/U-C-(II+III)	
			50 Years	200 Years	50 Years	200 Years	50 Years	200 Years
Land-Use Scenario A	Stone Masonry SM	1,890,900	52.3	53.2	8.2	12.0	60.5	65.3
	Brick Masonry BM	470,250	23.0	29.5	4.7	6.2	27.7	35.8
	Strengthened Masonry STM	947,250	6.4	10.1	1.2	1.3	7.6	11.4
	Reinforced Concrete Frame Buildings RCFS	855,750	7.3	9.4	—	—	7.3	9.4
Land-Use Scenario B	Brick Masonry BM	1,037,520	22.9	29.2	4.6	6.2	27.5	35.4
	Strengthened Masonry STM	2,270,380	6.3	9.8	1.2	1.3	7.5	11.1
	Reinforced Concrete Frame Buildings RCFS	855,750	7.3	9.4	—	—	7.3	9.4
	Total for the Region Land-Use Scenario A	4,164,150	29.3	31.7	4.5	6.5	33.8	38.7
	Total for the Region Land-Use Scenario B	4,164,150	10.6	14.6	1.8	2.3	12.4	16.8

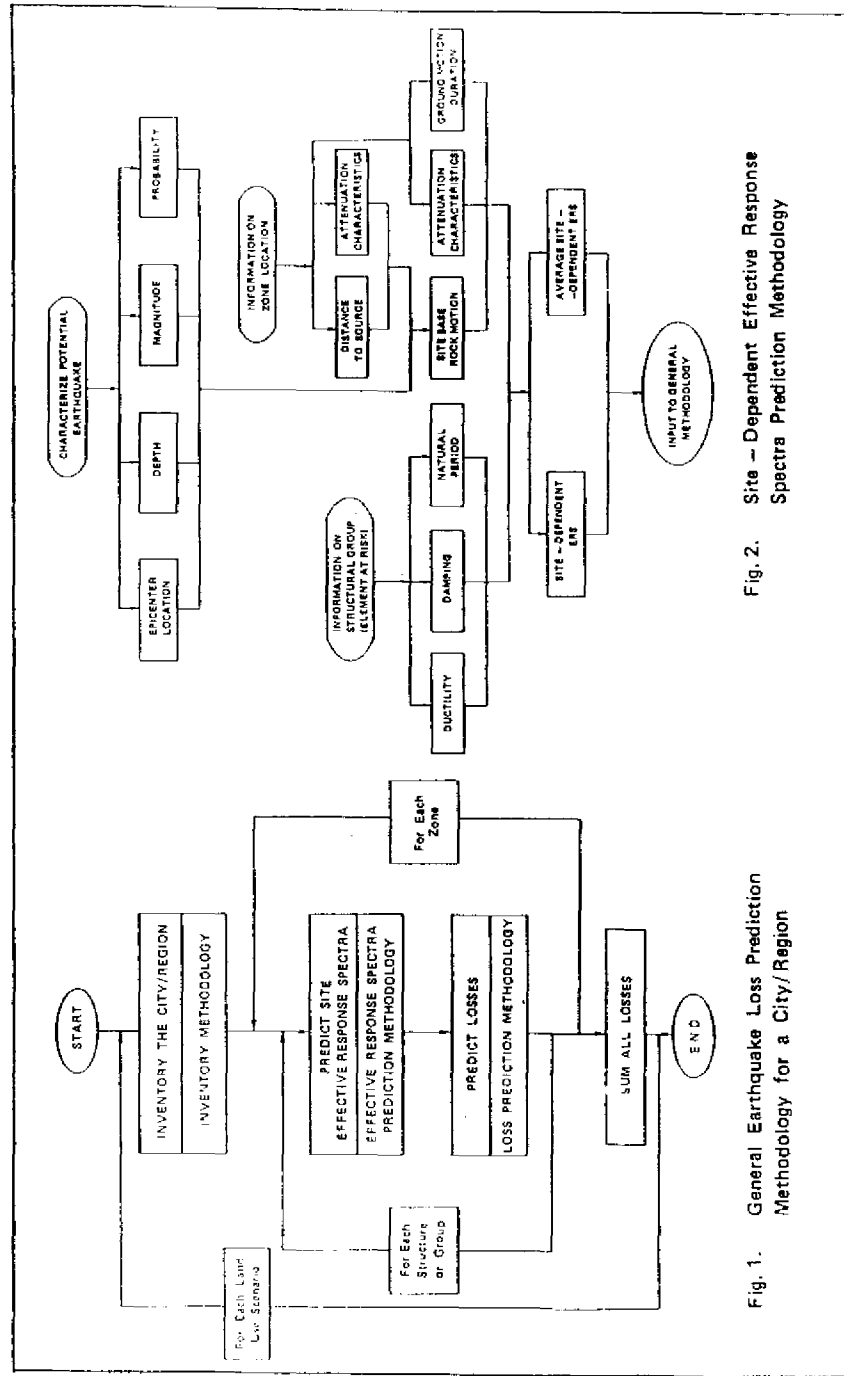


Fig. 1. General Earthquake Loss Prediction Methodology for a City/Region

Fig. 2. Site-Dependent Effective Response Spectra Prediction Methodology

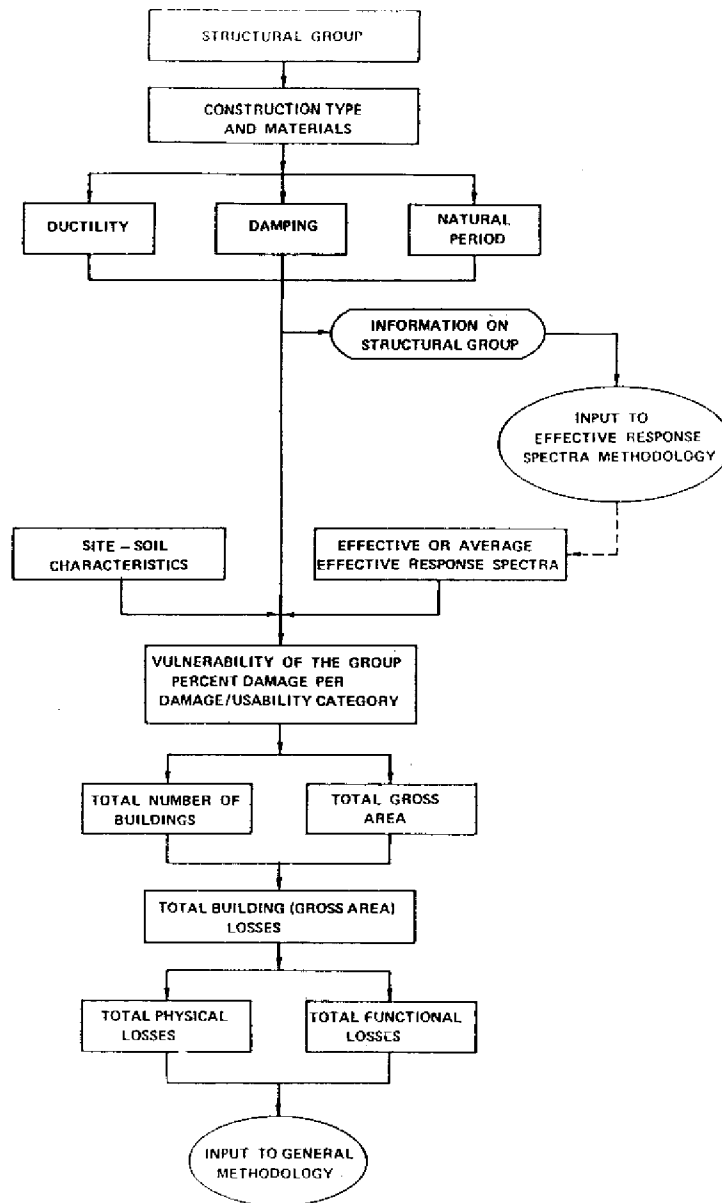


Fig. 3. Loss Prediction Methodology for Group of Structures

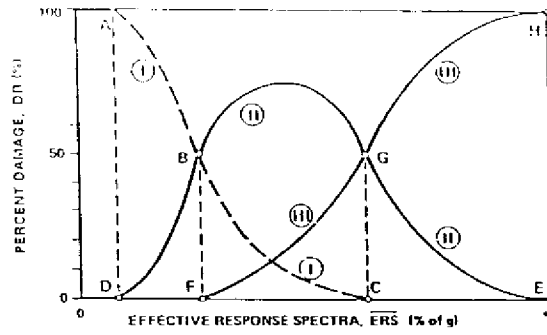


Fig. 4. Physical (Functional) Vulnerability Functions for Adopted Damage/Useability Categories

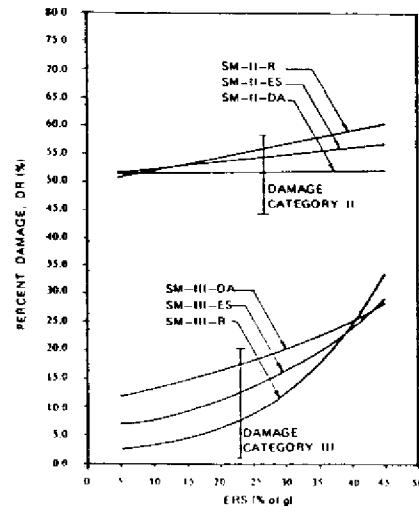


Fig. 5. Empirical Vulnerability Functions Generalized for SM Building Class

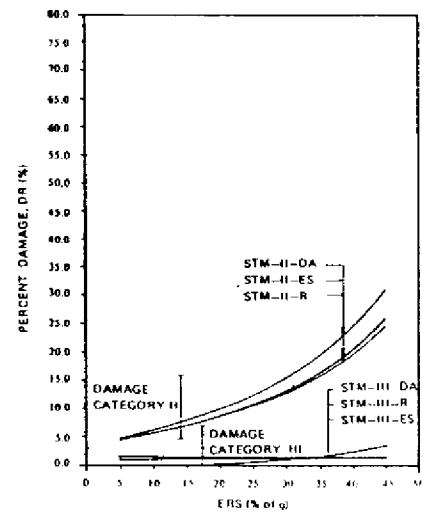


Fig. 6. Empirical Vulnerability Functions Generalized for STM Building Class

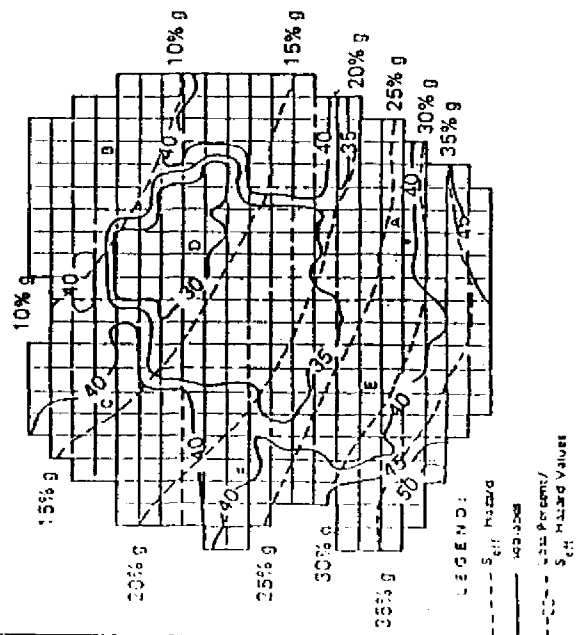


Fig. 7. 200 Years Return Period S_{eff} Hazard Map and Corresponding Isolabes (in %) for LU-S-A

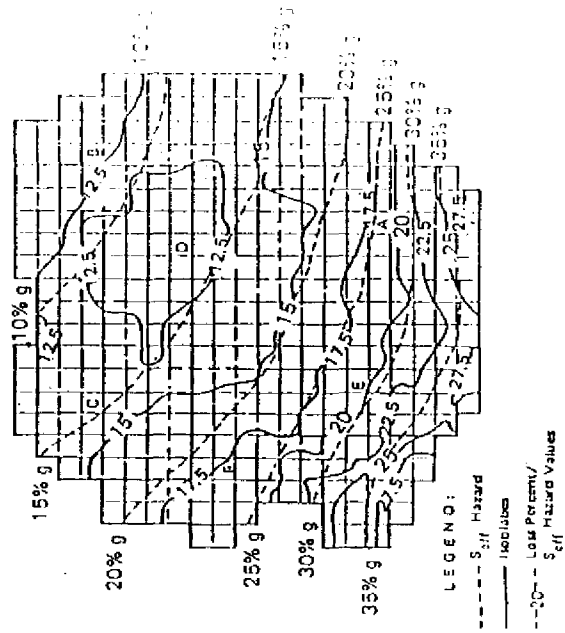


Fig. 8. 200 Years Return Period S_{eff} Hazard Map and Corresponding Isolabes (in %) for LU-S-B