

METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DE VULNERABILIDAD DE CENTROS URBANOS

Sánchez-Silva M.¹, Yamín L.², Cardona O.D.³

*Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de los Andes Bogotá Colombia*

RESUMEN:

En este documento se propone un procedimiento dirigido a la evaluación del grado de vulnerabilidad física de una ciudad ante un evento sísmico, con fines de planificación urbana o de apoyo a los planes de respuesta en caso de emergencia. La metodología se basa en la comparación del espectro de desplazamiento del evento y las "curvas de daño". Estas últimas relacionan los valores de desplazamiento que producen la fisuración, la fluencia o el estado último de la estructura, con su periodo natural de vibración. Se encontraron dichas curvas para edificaciones de muros de mampostería, pórticos de concreto, sistemas duales y sistemas de paneles prefabricados. La calibración del modelo se realizó con el terremoto de Caracas de 1967 y se llevo a cabo una aplicación práctica sobre una zona de Santafé de Bogotá.

1 INTRODUCCION

El crecimiento de los centros urbanos durante las últimas décadas, ha llevado consigo la construcción de una gran cantidad de obras, de tal forma que construcciones de distinto tipo, edad y finalidad se mezclan abigarradamente en nuestras ciudades. Por lo tanto, es necesario, no sólo desarrollar códigos que aseguren el adecuado comportamiento de nuevas estructuras, sino que permitan mejorar las existentes. Puesto que la prevención es la mejor actitud de cara al futuro, este trabajo está dirigido a desarrollar una metodología para evaluar la vulnerabilidad sísmica de ciudades, con el fin de apoyar planes de intervención y emergencia adecuados, que permitan responder de la mejor manera posible en caso de que se presente un desastre.

2 OBJETIVO

Este trabajo está dirigido a desarrollar una metodología que permita determinar fácilmente el grado de exposición de una ciudad ante un evento sísmico cualquiera. De la misma forma, se busca evaluar la distribución de los daños esperados, en una zona determinada, ante un evento específico, con el fin de intervenir la vulnerabilidad y/o los producidos por un evento real, para apoyar los planes de emergencia en una situación de desastre.

1 Ingeniero Civil, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia

2 Ingeniero Civil, Universidad de los Andes, Bogotá Colombia

3 Ingeniero Civil, Director Oficina Nacional para la Atención y Prevención de Desastres.
Bogotá Colombia.

3 MARCO TEORICO

3.1 Origen de los sismos y espectros de respuesta

Los movimientos de las placas tectónicas y otros fenómenos de acomodamiento de las masas de roca, producen con el paso del tiempo, una acumulación de energía elástica. Los sismos ocurren cuando esa energía es liberada subitamente. La mayor parte de esta energía, se disipa, a través de las ondas sísmicas que son las que afectan directamente la estructura.

La respuesta estructural, por su parte, está condicionada por la interacción de las fuerzas de: inercia, amortiguamiento, elástica y la externa dinámica proveniente del movimiento sísmico. En términos generales, la respuesta estructural puede modelarse como un sistema de uno o varios grados de libertad. El segundo caso, es una generalización del primero que involucra ecuaciones diferenciales de segundo orden del mismo tipo que las empleadas para osciladores simples. Para evaluar la respuesta estructural ante un evento sísmico, se han desarrollado los llamados espectros de respuesta. Sarria (ref 2) los define como "el conjunto de máximos valores de desplazamiento, velocidad o aceleración, que sobre un oscilador simple puede generar una carga aleatoria o determinista". Estos tienen la ventaja de permitir la comparación de diferentes estructuras con solo conocer la relación entre su masa y su rigidez.

3.2 Metodologías para la evaluación de vulnerabilidad

En términos generales, la vulnerabilidad puede entenderse como la predisposición intrínseca de un elemento o sujeto a sufrir daño debido a posibles acciones externas. La vulnerabilidad puede dividirse en dos categorías: física y funcional. La primera se refiere a la capacidad estructural mientras que la segunda esta relacionada con su funcionalidad. La evaluación de vulnerabilidad física puede ser de dos tipos: analítica y cualitativa. Los métodos analíticos están dirigidos un poco más al estudio de edificaciones individuales y no a evaluaciones de grandes centros urbanos. El motivo principal es que se entra en el análisis detallado de la respuesta de cada uno de los elementos constitutivos de la estructura ante un cierto evento para encontrar la respuesta general del edificio. Los métodos cualitativos, por su parte, se dirigen hacia la realización de estudios de vulnerabilidad de centros urbanos. El procedimiento requiere de inspecciones rápidas y generales con las que se pueda obtener la máxima cantidad de información posible, con el fin de estimar el comportamiento estructural. Se han desarrollado entonces, diferentes metodologías que pretenden obtener la mayor cantidad de información posible a través de observaciones de campo, utilizando cuestionarios y recurriendo posteriormente a procesos estadísticos. Algunos de los métodos más importantes son (ref 6): el Japonés, ATC-14, NAVFAC, Venezolano, y el Mexicano.

4 DEFINICION DEL PROBLEMA

Dado que el desplazamiento es la condición primordial para la ocurrencia de daños en una estructura, esta metodología pretende relacionarlo con el espectro de desplazamiento proveniente del sismo. En primer lugar, se supone que se conoce el desplazamiento para el

cual, en un cierto tipo de estructura, aparece la primera grieta o la fluencia y aquel para el cual se forma un mecanismo de colapso. Por otro lado, con el registro del sismo en estudio, se puede obtener el espectro de respuesta, que representa el valor de desplazamiento máximo al que se vio sometida la estructura. Es de esperar que, si se comparan los valores de desplazamiento anteriormente mencionados y se cuenta con un adecuado inventario de edificaciones, se pueda obtener una medida aproximada de los daños esperados y su localización.

5 METODOLOGIA DEL ESTUDIO

El procedimiento completo de la metodología propuesta, se presenta en la figura 1 e involucra diferentes campos de investigación. En este documento solo se tratarán los referentes a las curvas de daño y a la comparación de espectros.

La metodología desarrollada en este trabajo requiere de las que de este momento en adelante se llaman "curvas de daño". Su objetivo principal es determinar, para cada tipo estructural previamente definido, el desplazamiento de fisuración o fluencia y el último. Cada estructura por su parte, está representada por un valor de periodo. La metodología está dirigida básicamente a estructuras con las siguientes características: un número de pisos inferior a diez, destinadas a vivienda u oficina, regulares en planta y en altura, luces similares y alturas de entrepiso entre 2.20 mts y 3.00 mts.

El procedimiento de este trabajo consistió en buscar el mayor número de ensayos de laboratorio posibles sobre estructuras de mampostería, sistemas aporticados, sistemas duales y sistemas prefabricados. En cada uno de ellos, se determinó el desplazamiento, medido como porcentaje de la altura en la cubierta, para el cual la estructura llegó a los estados límites de fisuración o fluencia y último. En este procedimiento se estudiaron ensayos realizados en diversos países como Colombia, Estados Unidos, México, Chile, Japón, Nueva Zelanda, Yugoslavia, China y Perú entre otros. Sobre la mampostería se obtuvo la mayor cantidad de información. En la ref 1, se presentan en forma detallada los resultados y los experimentos estudiados.

Los resultados encontrados indican que las derivas de fisuración para los diferentes sistemas estructurales, en porcentaje de la altura total medidos en cubierta, son: mampostería 0.10%; sistemas prefabricados 0.15% y para sistemas aporticados y sistemas duales 0.60%. Por su parte las derivas últimas son: 0.50% para mampostería, 0.60% para sistemas prefabricados y 2.0% para sistemas aporticados y duales de concreto reforzado. Los periodos estructurales aproximados, que se utilizaron en este estudio se adoptaron del CCCSR-84 (ref 4) y de diferentes estudios (ref 1). En la tabla 1 se muestran los valores empleados. Los anteriores valores permiten definir los valores medios, de las curvas de daño, por medio de las ecuaciones mostradas en la tabla 2.

Con el fin de ubicar los resultados dentro del contexto real de las estructuras en una ciudad, se decidió clasificarlas en tres categorías: buena, regular y mala calidad. Para cada tipo estructural se definen, entonces, tres curvas de daño en función de la desviación estándar de los resultados obtenidos. En la figura 2 se muestran estas curvas para mampostería y sistemas aporticados.

Tabla 1
Períodos estructurales aproximados

Tipo estructural	Fórmula del período(seg)
Mampostería	$T_a = 0.055 * N$
S.Prefabricados	$T_a = 0.035 * N$
S.Aporticados	$T_a = 0.085 * H^{(3/4)}$
S.Duales	$T_a = 0.061 * H^{(3/4)}$

Ta:Período aproximado en seg.;H: altura en mts.

Tabla 2
Ecuaciones de las curvas de daño para h=2.60 mts

Tipo Estructural	Curva de fisuración o fluencia	Curva desplaz. últimos
-Mampostería	$F_m = 0.26 * N$	$U_m = 1.30 * N$
-S.Aporticados o S. Duales	$Y_c = 1.56 * N$	$U_c = 5.20 * N$
-S.prefabricados	$F_p = 0.40 * N$	$U_p = 1.70 * N$

N.Número de pisos; h:altura de estrepiso; Fm:Desplazamiento de fisuración para mampostería; Yc:Desplazamiento de fisuración para porticos; Fp:Desplazamiento de fisuración para sistemas prefabricados; Uc:Desplazamiento ultimo para pórticos o sistemas duales; Um:Desplazamiento último para mampostería; Up:Desplazamiento último para sist.prefabricados

6 EVALUACION DE PERDIDAS

Para la evaluación de pérdidas, se superpondrán el espectro de desplazamiento del sismo medido en superficie y las curvas definidas en la tabla 2 para cada tipo estructural. Sin embargo, al espectro de desplazamiento hay que hacerle algunas modificaciones.

Puesto que éste representa los desplazamientos de un sistema de un grado de libertad, es necesario transformar el desplazamiento generalizado en el desplazamiento de la estructura medido en la cubierta. De acuerdo con la dinámica de estructuras, el análisis modal se basa en superponer las respuestas individuales de los modos naturales de vibración, en la cual cada modo posee su propio patrón de deformación, período y amortiguamiento. Por otro lado, el CCCSR-84 especifica que para evaluar la respuesta estructural de edificaciones de más de dos pisos deben incluirse por lo menos los tres primeros modos o todos aquellos con períodos superiores a los 0.4 seg. Para estructuras hasta de 10 pisos, como las consideradas en este estudio, el período fundamental aproximado del segundo modo es del orden de 0.3 seg y los modos superiores tienen períodos inferiores. Por este motivo y considerando que se quiere estimar la respuesta en forma aproximada, en este estudio se considerará únicamente el primer modo (fig 3a). De acuerdo a lo anterior, para encontrar los desplazamientos verdaderos, de una estructura que vibra de acuerdo a un cierto modo, los desplazamientos modales deben multiplicarse por un factor que es función del modo de vibración y de la matriz de masa de la estructura (fig 3a). La ecuación 1 muestra la determinación de dicho factor.

$$Y = \frac{\{\phi\}^T [M]}{\{\phi\}^T [M] \{\phi\}} S_d \quad (\text{ec } 1)$$

Donde $\{\phi\}$ representa el vector de desplazamientos modales, $[M]$ la matriz de masa de la estructura y S_d el desplazamiento espectral. Una vez multiplicado el espectro elástico de desplazamiento por este factor, se debe estudiar el comportamiento inelástico de la estructura con el fin de determinar su condición última. Suponiendo un comportamiento estructural elastoplástico, el espectro inelástico se obtendrá con base en la teoría de conservación de energía como se muestra en la figura 3b y 3c. Fundamentalmente se trata de disipar la energía elástica exigida por el sismo a través de deformaciones inelásticas (ref 2).

El procedimiento para evaluar el espectro de desplazamiento del evento que se va a superponer a las curvas de daño, se puede resumir de la siguiente forma: 1) calcular el espectro de desplazamiento del sismo en superficie por métodos tradicionales; 2) multiplicarlo por el factor obtenido en la ecuación 1 y 3) si este supera la curva de fisuración o fluencia de la estructura, se debe calcular el espectro inelástico como se describió en el párrafo anterior

Por último, para el análisis modal, el CCCSR-84 (ref 4) permite que se utilicen periodos estructurales, superiores en un cuarenta por ciento, a los calculados en forma aproximada para la definición de las curvas de daño. De esta forma, se supuso que todas las edificaciones de n-pisos, se encuentran localizadas dentro de un rango de periodos cuyo valor medio es 1.4 veces el período aproximado calculado de acuerdo con la tabla 1. En la figura 2 se aprecian dichos rangos para mampostería y sistemas aperticados.

Para el cálculo de las pérdidas se definieron cinco estados de daño que siguen básicamente los criterios propuestos por varios autores (ref 3): no daño, daños menores, daños moderados, daños severos y colapso. Esto debe hacerse para cada tipo estructural y cada calidad estructural. La determinación de estas zonas es función de la desviación estandar y se puede apreciar en la figura 4.

7 CALIBRACION DEL MODELO

Con el fin de comprobar la veracidad de la metodología, se compararon los informes de daños del sismo de Caracas de 1967 (ref 3) y los obtenidos mediante la aplicación del modelo. Aun cuando no se tienen registros de este sismo, los espectros suavizados estimados por diferentes autores (ref 3), están muy bien documentados. Por otro lado, el reporte de daños es bastante completo y la presentación de los resultados se ajusta a la que ofrece este informe.

En la figura 5 se presentan los resultados de mampostería y pórticos de concreto reforzado para diferentes tipos de suelo. Como se puede ver, los resultados obtenidos se asemejan bastante a los medidos. Lo que se indica como un ajuste de la metodología, es simplemente un cambio de los porcentajes de edificaciones de un cierto número de pisos, con respecto a los observados. Es claro que, aun cuando éste no es el mejor evento para la calibración, la metodología podría ser empleada, si se conoce el reporte de daños, para estimar el

espectro del sismo que afectó la zona.

8 APLICACION PRACTICA DEL MODELO

Como complemento de lo anterior y tratando de mostrar la utilidad del trabajo, se llevó a cabo una aplicación práctica del procedimiento sobre una zona de Santafé de Bogotá. La región escogida comprende el sector entre la avenida Suba y la carrera 2 y entre calles 100 y 140 aproximadamente. La mayor parte de esta zona es de tipo residencial, con diferentes calidades estructurales y edificaciones con alturas inferiores a diez pisos. Se compararon los reportes de daños esperados si ocurriesen los sismos previstos, en el CCCSR-84, para Santa Marta, Bogotá y Cali. En la figura 6, se presenta la distribución de daños esperados en la zona para las diferentes calidades estructurales y para edificaciones de mampostería y pórticos de concreto reforzado. En la referencia 1, se puede observar el número de estructuras dañadas por barrio, por calidad estructural y la distribución de daños en cada zona.

Los resultados encontrados (fig 6) y (ref 1), mostraron que en general la tendencia de los daños sigue el comportamiento esperado y que con base en ellos, las entidades gubernamentales pueden tomar importantes decisiones con el fin de intervenir la vulnerabilidad de algunas zonas.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base a los resultados encontrados, la metodología propuesta presenta grandes ventajas, como son: a) reduce la participación de expertos convirtiéndola en una evaluación sencilla de las estructuras y elimina la estimación de situaciones hipotéticas; b) es fácil de calibrar con reportes de daños de eventos pasados; c) puede compararse con las metodologías tradicionales a través de las matrices de daño; d) es muy útil para llevar a cabo estudios de sensibilidad conducentes a determinar el evento que causaría cierto tipo de daños, o, para establecer las zonas que requerirían mayor intervención; e) en caso de ocurrencia de un evento real, podría emplearse para definir los sitios de concentración de daños en forma aproximada y para la planificación de operativos de emergencia; f) el procedimiento es de fácil aplicación; g) finalmente, con un adecuado inventario, reduce considerablemente el trabajo para la evaluación de vulnerabilidad, en comparación con el demandado por los métodos tradicionales.

Dentro de las desventajas, se cuentan: a) sus resultados pueden verse alterados dependiendo de las características estructurales de la zona bajo consideración; b) el modelo elastoplástico supuesto para evaluar el comportamiento estructural, puede no ser muy preciso en ciertos casos, lo que se traduciría en el cálculo de un espectro inelástico erróneo; c) la falla por cortante, en pórticos de concreto reforzado especialmente, debe ser revisada antes del empleo de esta metodología para asegurar que la falla no se presentará por esta causa.

Se recomienda, continuar las investigaciones sobre esta metodología y dirigirlas en especial: al mejoramiento de las curvas de daño; a la calibración empleando reportes de daños sobre eventos pasados; a la implementación de un procedimiento para evaluar la falla prematura por cortante; a la evaluación de los efectos colaterales y la vulnerabilidad funcional, para

incluirlos dentro del procedimiento general y a la evaluación de las pérdidas económicas y sociales.

El procedimiento de la comparación entre las "curvas de daño" y los espectros de desplazamiento, es un forma bastante clara de ver los daños. Las curvas de daño aquí deducidas, definen los límites entre los cuales se presenta cada tipo de daño. Lo anterior puede mejorar, en buena parte, las relaciones entre aceleración y daños, que han demostrado en muchos casos no ser muy precisas.

10 AGRADECIMIENTOS

El autor agradece de manera muy especial a los doctores Luis Yamin L. y Omar Dario Cardona A. quienes dirigieron su trabajo e hicieron importantes aportes para su desarrollo. Además reconoce la colaboración y el apoyo, que a su iniciativa dieron los doctores Alberto Sarria M., Carlos Bernal L. y Luis Enrique García R.

11 REFERENCIAS

1-Sánchez-Silva M., Yamin L., Cardona O.D., METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DE VULNERABILIDAD DE CENTROS URBANOS. Tesis de grado, Universidad de los Andes, Departamento de Ingeniería Civil. Santafé de Bogotá, Agosto de 1992.

2-Sarria A., INGENIERIA SISMICA. Ediciones Uniandes, Universidad de los Andes , Santafé de Bogotá 1991.

3-Centro Regional de Sismología para America del Sur (CERESIS), EVALUACION DE LOS EFECTOS ECONOMICOS DE LOS TERREMOTOS (ECOSIS). Volúmenes 13a, 13b, 13c. Lima Perú 1985.

4-Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, CODIGO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIONES SISMO-RESISTENTES (CCCSR-84). Decreto ley 1400 del 7 de junio de 1984.

5-Cardona O.D., METODOLOGIAS PARA LA EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD SISMICA DE EDIFICACIONES Y CENTROS URBANOS. Santafé de Bogotá 1991.

6-Cardona O.D., PROYECTO INTEGRAL DE MITIGACION DE RIESGO SISMICO URBANO, METODOLOGIAS Y ESTRATEGIAS PARA SU COORDINACION Y MANEJO EN COLOMBIA. Bogotá 1991.

7-Campos A., METODOLOGIA PARA LA EVALUACION DE LA VULNERABILIDAD Y EL RIESGO SISMICO PARA UN SISMO INTENSO EN LA CIUDAD DE PEREIRA. Tesis de grado, Universidad de los Andes, Bogotá 1991.

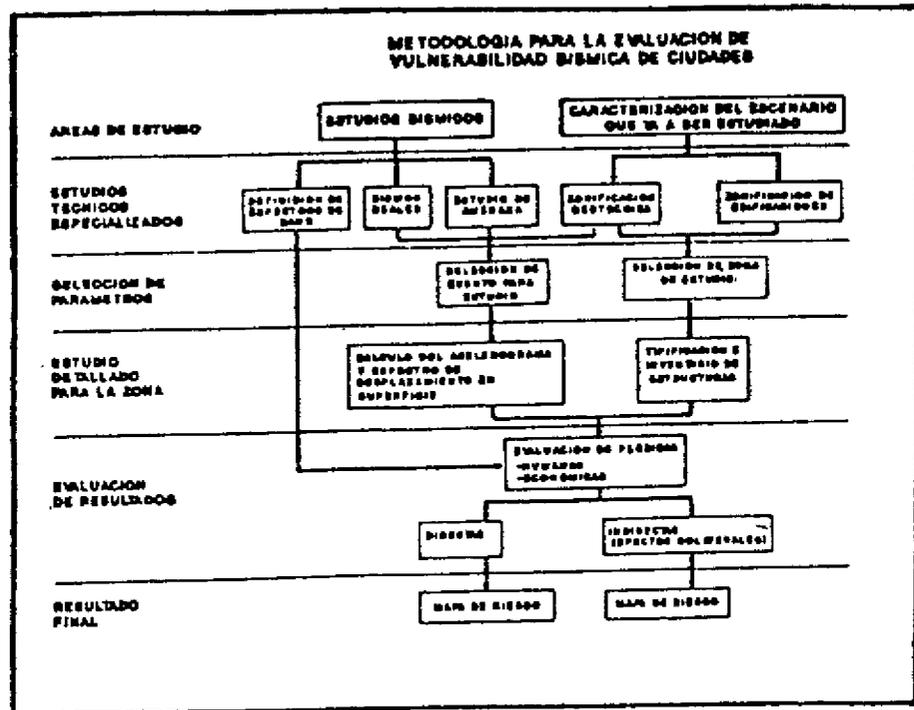
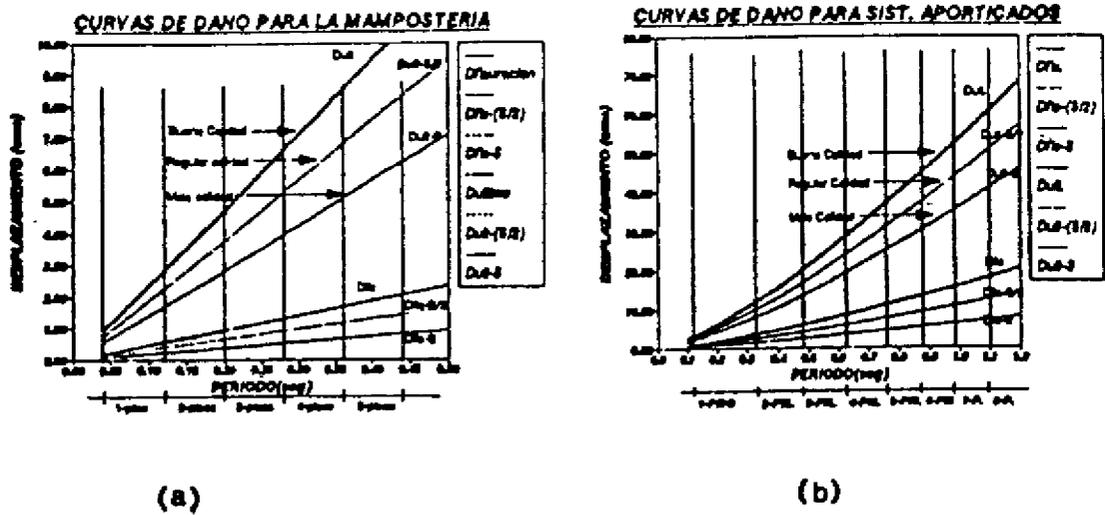
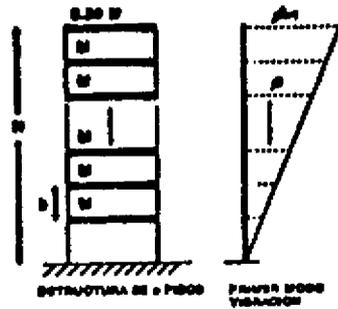


Figura 1



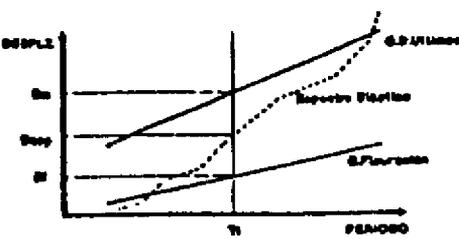
MODO DE VIBRACION EMPLEADO EN EL ANALISIS



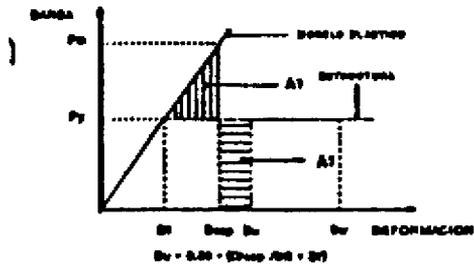
$$V_{max} = \delta_m^2 \sum_{i=1}^n M_i^2 / \sum_{i=1}^n M_i$$

(a)

CALCULO DE ESPECTROS INELASTICOS



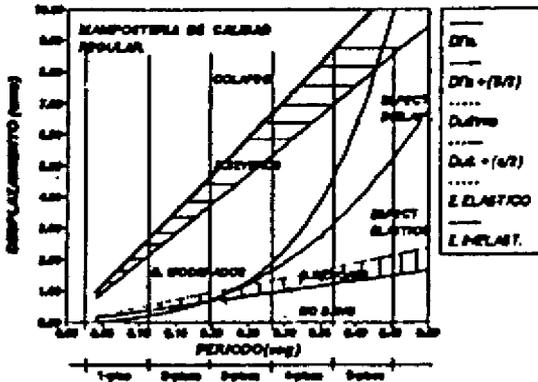
(b)



(c)

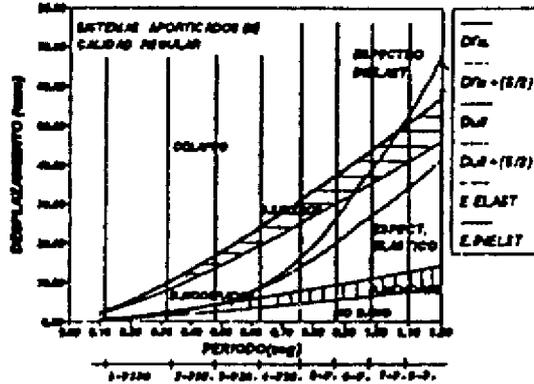
Figura 3

CURVAS DAÑO Y DE DESPLAZAMIENTO (ZRSI)



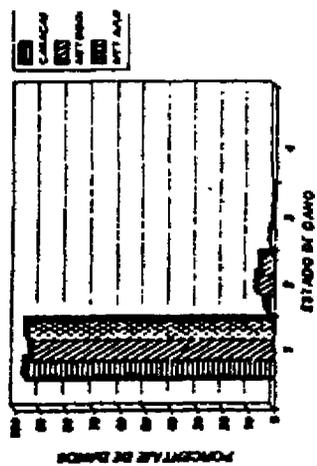
(a)

CURVAS DAÑO Y DE DESPLAZAMIENTO (ZRSI)

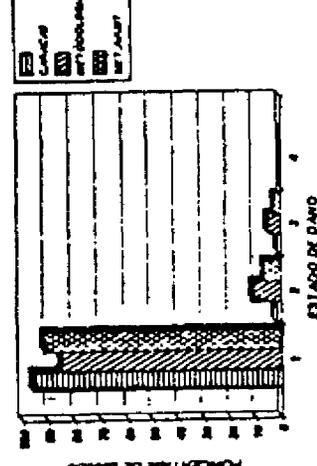


(b)

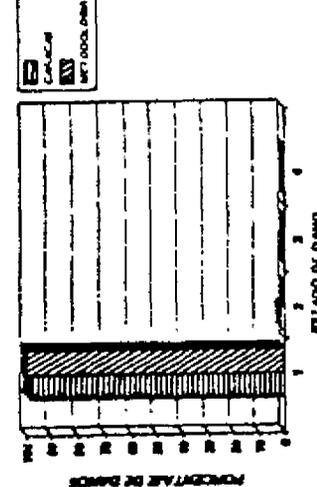
REPORTE DE DAÑOS-SISMO DE CARACAS 1967
MAMPOSTERÍA HASTA 3 PISOS-PROF.1967



REPORTE DE DAÑOS-SISMO DE CARACAS 1967
MAMPOSTERÍA HASTA 3 PISOS-PROF.MEDIA

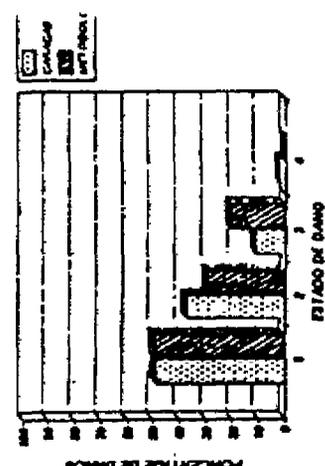


REPORTE DE DAÑOS-SISMO DE CARACAS 1967
MAMPOSTERÍA HASTA 3 PISOS-ROCA

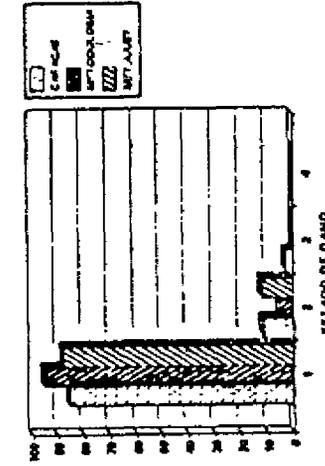


(a)

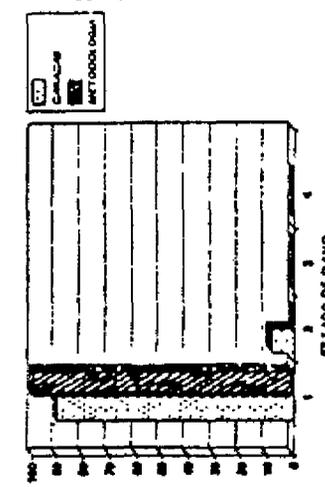
REPORTE DE DAÑOS-SISMO DE CARACAS 1967
PORTICOS DE 4 A 10 PISOS-PROF.120-200M



REPORTE DE DAÑOS-SISMO DE CARACAS 1967
PORTICOS DE 4 A 10 PISOS-PROF.MEDIA

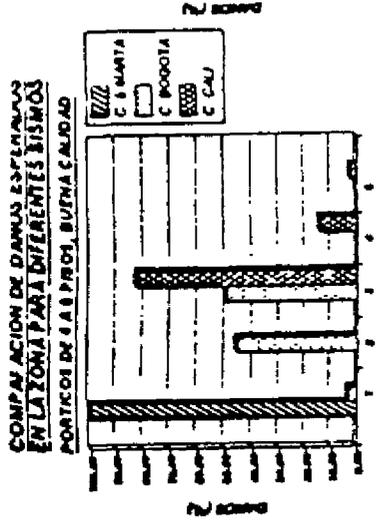
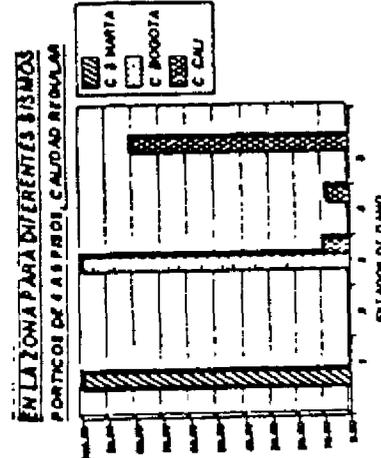
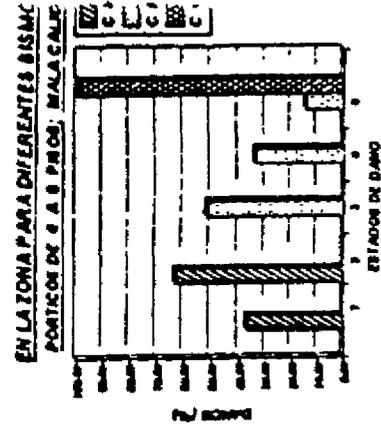


REPORTE DE DAÑOS-SISMO DE CARACAS 1967
PORTICOS DE 4 A 10 PISOS-ROCA

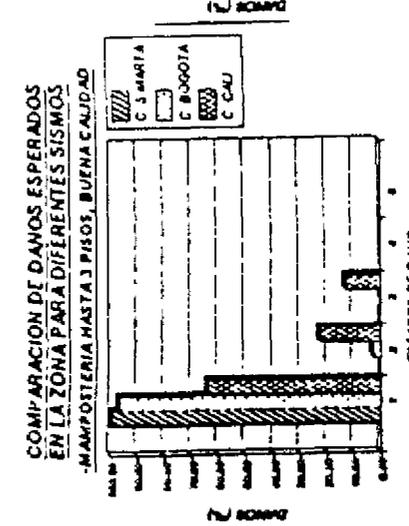
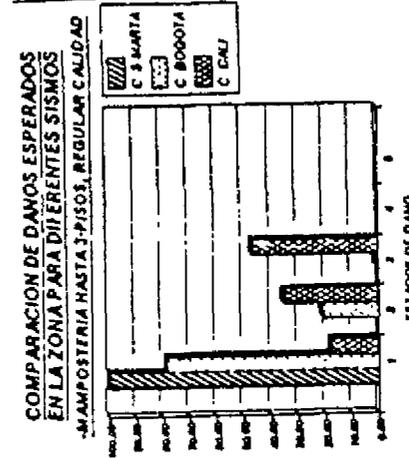
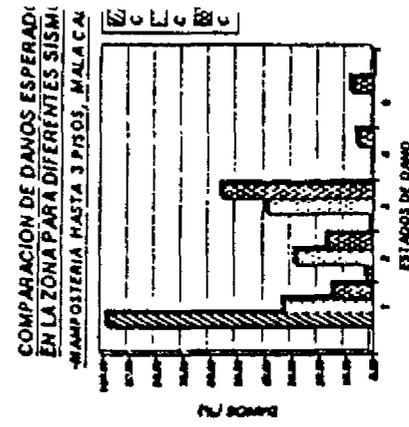


(b)

Figura 5



(a)



(b)

Figura 6



**MAMPOSTERIA Y
COMPORTAMIENTO DE MATERIALES**