

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**CURVAS DE FRAGILIDAD Y EVALUACIÓN RÁPIDA DE
LA VULNERABILIDAD DE ESTRUCTURAS**

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

CARLOS DANIEL BOBADILLA DE LA TORRE

SANGOLQUI, 21 de Diciembre del 2005

EXTRACTO

Mediante el análisis no lineal de 692 casos de estructuras de hormigón armado, constituidas por vigas y columnas, de uno a seis pisos y sometidas a nueve registros sísmicos de Colombia, cuya aceleración máxima del suelo fue mayor a 0.1 g., se presentan curvas de fragilidad para cada uno de los pisos. La geometría, armado y materiales de las estructuras responden a la forma como se construye en el Ecuador. Se presentan curvas de fragilidad para cuatro niveles de daño sísmico denominados: leve, moderado, extensivo y completo.

Adicionalmente se comparan las distorsiones máximas de piso, obtenidos del análisis no lineal, con las obtenidas utilizando la metodología rápida para el cálculo de la distorsión de piso propuesto en Aguiar (2005). Para así poder presentar una metodología rápida para la determinación de la vulnerabilidad de edificios de hormigón armado de 1 a 6 pisos en el Ecuador.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el **SR. CARLOS DANIEL BOBADILLA DE LA TORRE** como requerimiento parcial a la obtención del título de **INGENIERO CIVIL**.

Sangolquí, 21 de Diciembre del 2005

Dr. Roberto Aguiar Falconí
DIRECTOR

Ing. Pablo Caiza Sánchez, Msc.
CODIRECTOR

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado especialmente a mi madre Teresa que estuvo siempre a mi lado brindándome su apoyo incondicional en todo momento con sus sabios consejos, y a mi padre Alberto que a pesar de no estar a mi lado este momento fue quien me inspiró a seguir en los momentos más difíciles que tuve a lo largo de mi carrera.

Carlos Bobadilla de la Torre

AGRADECIMIENTO

Especialmente a mis directores Dr. Roberto Aguiar y al Ing. Pablo Caiza por brindarme todos sus conocimientos y haberme dado la oportunidad de terminar con éxito mi proyecto de grado.

Al Dr. Luis Cumbal Director del Centro de Investigaciones Científicas de la ESPE, por permitirme realizar mi proyecto de grado allí brindándome todas las facilidades para su elaboración a lo largo de todo el periodo que duro su realización.

A la Ing. Anita Haro por haberme ayudado a lo largo de toda mi carrera profesional al estar siempre abierta y dispuesta a resolver cualquier inquietud presentada en mi formación académica.

A la facultad de Ingeniería Civil especialmente al Ing. Jorge Zúñiga por sus consejos y motivación a lo largo de toda la carrera.

A Celia Castro por apoyarme en todo momento brindándome su ayuda incondicional.

Al Sociólogo Diego Zaldumbide por haberme brindado su ayuda en la parte final de este trabajo.

Carlos Bobadilla de la Torre

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I.- CURVAS DE FRAGILIDAD

RESUMEN	1
1.1 DEFINICIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD	2
1.2 NIVELES DE DAÑO	3
1.3 METODOLOGÍAS DE CÁLCULO DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD	7

CAPÍTULO II.- OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD

RESUMEN	20
2.1 ANÁLISIS NO LINEAL DE EDIFICIOS	21
2.1.1 ANÁLISIS DINÁMICO NO LINEAL (IDARC 4 β)	25
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SÍSMOS DE ANÁLISIS	34
2.3 TABULACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS	36
2.4 CLASIFICACIÓN DE RESULTADOS POR NIVELES DE DAÑO	65
2.5 DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD	95

CAPÍTULO III.- EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

RESUMEN	128
3.1 EVALUACIÓN RÁPIDA DEL DRIFT DE UN EDIFICIO DE H.A.	129
3.1.1 COEFICIENTE β_1	129
3.1.2 COEFICIENTE β_2	130
3.1.3 COEFICIENTE β_3	131
3.1.4 COEFICIENTE β_4	132
3.1.5 COEFICIENTE β_5	133
3.2 INVESTIGACIONES REALIZADAS POR LA ESPE	134
3.3 DETERMINACIÓN DE LOS ESPECTROS DE DESPLAZAMIENTO	137
3.4 CÁLCULO DE LOS PARAMETROS QUE INTERVIENEN EN LA EVALUACIÓN DEL DRIFT	141
3.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS	161

CAPÍTULO IV.- METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

RESUMEN	166
4.1 METODOS PARA ESTIMAR LA VULNERABILIDAD DE EDIFICACIONES	167
4.1.1 MÉTODOS ANALÍTICOS	167

4.1.2 MÉTODOS CUALITATIVOS	168
4.2 CÁLCULO DEL DRIFT MÁXIMO	169
4.3 CÁLCULO DE LOS NIVELES DE DAÑO CON CURVAS DE FRAGILIDAD OBTENIDAS	172
4.4 RELACIÓN ENTRE INDICE DE DAÑO Y PORCENTAJE DE DAÑO ACUMULADO	175
4.4.1 INDICE DE DAÑO	175
4.1.2 PORCENTAJE DE DAÑO ACUMULADO	176
4.5 COMPARACIÓN CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA POR HAZUS	178
4.5.1 DETERMINACIÓN DEL DAÑO EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO	178
4.5.2 DAÑO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES	180

CAPÍTULO V.- COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

RESUMEN	201
5.1 COMENTARIOS	202
5.2 CONCLUSIONES	205
5.3 RECOMENDACIONES	209

LISTADO DE TABLAS

CAPÍTULO I.- CURVAS DE FRAGILIDAD

Tabla 1.1 Drift (%) Para estructuras de concreto reforzado (Ghoborah et al 2004)

Tabla 1.2 Criterios para la evaluación del desempeño estructural. Ghoborah et al (1997)

Tabla 1.3 Limites del drift

Tabla 1.4 Estados discretos de daño e intervalos de variación del factor de daño (ATC, 1985)

Tabla 1.5 Valores medios y desviación estándar de los desplazamientos espectrales para los estados de daño.

CAPÍTULO II.- OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD

Tabla 2.1 Armadura longitudinal y transversal considerada en el estudio.

Tabla 2.2 Dimensiones de columnas y vigas.

Tabla 2.3 Datos relevantes de los sismos considerados en el estudio.

Tabla 2.4 Resultados obtenidos de Programa IDARC 4β. Para 1 piso

Tabla 2.5 Resultados obtenidos de Programa IDARC 4β. Para 2 pisos

Tabla 2.6 Resultados obtenidos de Programa IDARC 4β. Para 3 pisos

Tabla 2.7 Resultados obtenidos de Programa IDARC 4β. Para 4 pisos

Tabla 2.8 Resultados obtenidos de Programa IDARC 4β. Para 5 pisos

Tabla 2.9 Resultados obtenidos de Programa IDARC 4β. Para 6 pisos.

Tabla 2.10 Niveles de daño propuestos por Ghobarah et al (1997)

Tabla 2.11 Clasificación por niveles de daño (Sin Daño).

Tabla 2.12 Clasificación por niveles de daño (Daño Leve).

Tabla 2.13 Clasificación por niveles de daño (Daño Moderado).

Tabla 2.14 Clasificación por niveles de daño (Daño Extensivo).

Tabla 2.15 Clasificación por niveles de daño (Daño Competo).

Tabla 2.16 Secciones de casos faltantes

Tabla 2.17 Drift máximos para el Piso 1

Tabla 2.18 Drift máximos para el Piso 2

Tabla 2.19 Drift máximos para el Piso 3

Tabla 2.20 Drift máximos para el Piso 4

Tabla 2.21 Drift máximos para el Piso 5

Tabla 2.22 Drift máximos para el Piso 6

Tabla 2.23 Valores para generación de las Curvas de Fragilidad (1 Piso)

Tabla 2.24 Valores para generación de las Curvas de Fragilidad (2 Pisos)

Tabla 2.25 Valores para generación de las Curvas de Fragilidad (3 Pisos)

Tabla 2.26 Valores para generación de las Curvas de Fragilidad (4 Pisos)

Tabla 2.27 Valores para generación de las Curvas de Fragilidad (5 Pisos)

Tabla 2.28 Valores para generación de las Curvas de Fragilidad (6 Pisos)

CAPÍTULO III.- EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

Tabla 3.1. Valores recomendados de β_1 para edificios en base a vigas y columnas.

Tabla 3.2. Valores de β_2 para diferentes variaciones de rigidez lateral.

Tabla 3.3. Valores de β_5 en función de la demanda de ductilidad.

Tabla 3.4. Cálculo de β_1 para estructuras de 1 a 6 pisos en H.A.

Tabla 3.5. Ductilidad de los casos analizados

Tabla 3.6 Periodos obtenidos

Tabla 3.7. Cálculo del Drift utilizando la metodología rápida para 1 piso

Tabla 3.8. Cálculo del Drift utilizando la metodología rápida para 2 pisos

Tabla 3.9. Cálculo del Drift utilizando la metodología rápida para 3 pisos

Tabla 3.10. Cálculo del Drift utilizando la metodología rápida para 4 pisos

Tabla 3.11. Cálculo del Drift utilizando la metodología rápida para 5 pisos

Tabla 3.12. Cálculo del Drift utilizando la metodología rápida para 6 pisos

Tabla 3.13. Relaciones entre Drift del IDARC y el Drift de la metodología rápida

CAPÍTULO IV.- METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

Tabla 4.1. Valores recomendados de β_1 para edificios en base a vigas y columnas.

Tabla 4.2. Valores de β_5 en función de la demanda de ductilidad.

Tabla 4.3. Resultados de las curvas para el ejemplo

- Tabla 4.4.** Resultados de daño esperado para el ejemplo
- Tabla 4.5** Interpretación del Índice de Daño (Park et al., 1986).
- Tabla 4.6** Modelos tipo de edificios
- Tabla 4.7** Relaciones de deriva en el umbral de Daño Estructural
- Tabla 4.8** Desplazamientos máximos para 1 piso [cm].
- Tabla 4.9** Desplazamientos máximos para 2 pisos [cm].
- Tabla 4.10** Desplazamientos máximos para 3 pisos [cm].
- Tabla 4.11** Desplazamientos máximos para 4 pisos [cm].
- Tabla 4.12** Desplazamientos máximos para 5 pisos [cm].
- Tabla 4.13** Desplazamientos máximos para 6 pisos [cm].
- Tabla 4.14** Parámetros que definen las Curvas de Fragilidad para un nivel de daño sísmico bajo (C1L)
- Tabla 4.15** Parámetros que definen las Curvas de Fragilidad para un nivel de daño sísmico bajo (C1M)
- Tabla 4.16** Tabla de generación de curvas de fragilidad propuestas por Hazus de 1-3 pisos.
- Tabla 4.17** Tabla de generación de curvas de fragilidad propuestas por Hazus de 4-7 pisos.
- Tabla 4.18** Límites de daño que utiliza Hazus en función del Drift.
- Tabla 4.19** Límites de daño que se utilizo en el método propuesto.

CAPÍTULO V.- COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Tabla 5.1** Parámetros para generar Curvas de Fragilidad a partir del drift
- Tabla 5.1** Parámetros para generar Curvas de Fragilidad a partir del desplazamiento

LISTADO DE FIGURAS

CAPÍTULO I.- CURVAS DE FRAGILIDAD

Figura 1.1 Niveles de daño en función del Drift

Figura 1.2 Curvas de fragilidad obtenidas por Yamaguchi y Yamazaki (sismo Kobe)

Figura 1.3 Ejemplo de curva de fragilidad experimentales (Chong y Soong, 2000)

Figura 1.4 Ejemplo de curvas de fragilidad obtenidas a partir de la opinión de expertos para un edificio de mampostería de elevación media (Anagnost et al., 1995) df es el factor de daño o “damage factor”

Figura 1.5 Esquema para la generación de curvas de fragilidad de forma expedita.

Figura 1.6 Curvas de fragilidad de un edificio de 6 pisos (España)

CAPÍTULO II.- OBTENCIÓN DE LAS CURVAS DE FRAGILIDAD

Figura 2.1 Planta tipo de edificios analizados.

Figura 2.2 Estructura de análisis para cuatro pisos

Figura 2.3 Corrección de fuerzas desequilibrantes

Figura 2.4 Cálculo del Corte debido a los efectos P-deltas

Figura 2.5 Acelerogramas de sismos considerados para el estudio

Figura 2.6 Curvas de Fragilidad para Estructuras de 1 Piso

Figura 2.7 Curvas de Fragilidad para Estructuras de 2 Pisos

Figura 2.8 Curvas de Fragilidad para Estructuras de 3 Pisos

Figura 2.9 Curvas de Fragilidad para Estructuras de 4 Pisos

Figura 2.10 Curvas de Fragilidad para Estructuras de 5 Pisos

Figura 2.11 Curvas de Fragilidad para Estructuras de 6 Pisos

CAPÍTULO III.- EVALUACIÓN RÁPIDA DE LA VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

Figura 3.1 Valores medios de β_3 para $\alpha = 0$.

Figura 3.2 Valores de β_2 para edificios con cuantía en columnas del 1%.

Figura 3.3 Valores medios obtenidos y curva de ajuste del parámetro β_2 .

Figura 3.4 Ventana de Tipo de Archivo.

Figura 3.5 Acelerograma del registro 31a.

Figura 3.6 Ventana de espectros de respuesta.

Figura 3.7 Espectro elástico graficado por el DEGTRA para el registro 31a.

Figura 3.8 Espectro elástico graficado por el EXCEL para el sismo 31a.

Figura 3.9 Espectros de desplazamiento elásticos utilizados en el estudio.

Figura 3.10 Relación entre la deriva máxima de piso encontrada con IDARC y la evaluación rápida.

Figura 3.11 Desviación estándar encontrada para cada piso.

CAPÍTULO IV.- METODOLOGÍA PARA ESTIMAR LA VULNERABILIDAD DE EDIFICIOS

Figura 4.1 Curvas de Fragilidad para edificios de 6 pisos

Figura 4.2 Histograma de daño presentado para el ejemplo

Figura 4.3 Proceso de Estimación del daño en Edificios (Hazus)

Figura 4.4 Curva de fragilidad para 1 piso

Figura 4.5 Curva de fragilidad para 2 pisos

Figura 4.6 Curva de fragilidad para 3 pisos

Figura 4.7 Curva de fragilidad para 4 pisos

Figura 4.8 Curva de fragilidad para 5 pisos

Figura 4.9 Curva de fragilidad para 6 pisos

Figura 4.10 Curva de fragilidad para edificios de 1-3 pisos.

Figura 4.11 Curva de fragilidad para edificios de 4-6 pisos.

Figura 4.12 Curva de fragilidad para edificios de 1-3 pisos propuesto por Hazus

Figura 4.13 Curva de fragilidad para edificios de 4-7 pisos propuesto por Hazus

Figura 4.14 Comparación entre Hazus y Propuesta para edificios de 1-3 pisos

Figura 4.15 Comparación entre Hazus y Propuesta para edificios de 4-6 pisos

CAPÍTULO V.- COMENTARIOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Figura 5.1 Curvas de fragilidad para edificios de 1 piso en H.A.

Figura 5.2 Curvas de fragilidad para edificios de 2 pisos en H.A.

Figura 5.3 Curvas de fragilidad para edificios de 3 pisos en H.A.

Figura 5.4 Curvas de fragilidad para edificios de 4 pisos en H.A.

Figura 5.5 Curvas de fragilidad para edificios de 5 pisos en H.A.

Figura 5.6 Curvas de fragilidad para edificios de 6 pisos en H.A.