

***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 $\beta$ ) | 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 $\beta_1$  | 129 |
| 3.1.2 COEFICIENTE $\beta_2$  | 130 |
| 3.1.3 COEFICIENTE $\beta_3$  | 131 |
| 3.1.4 COEFICIENTE $\beta_4$  | 132 |
| 3.1.5 COEFICIENTE $\beta_5$  | 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<br>DE FRAGILIDAD OBTENIDAS | 172 |
| 4.4 RELACIÓN ENTRE INDICE DE DAÑO Y<br>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<br>PROPUESTA POR HAZUS                | 178 |
| 4.5.1 DETERMINACIÓN DEL DAÑO EN EDIFICIOS DE<br>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  $\beta_1$  para edificios en base a vigas y columnas.

**Tabla 3.2.** Valores de  $\beta_2$  para diferentes variaciones de rigidez lateral.

**Tabla 3.3.** Valores de  $\beta_5$  en función de la demanda de ductilidad.

**Tabla 3.4.** Cálculo de  $\beta_1$  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  $\beta_1$  para edificios en base a vigas y columnas.

**Tabla 4.2.** Valores de  $\beta_5$  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  $\beta_3$  para  $\alpha = 0$ .

**Figura 3.2** Valores de  $\beta_2$  para edificios con cuantía en columnas del 1%.

**Figura 3.3** Valores medios obtenidos y curva de ajuste del parámetro  $\beta_2$ .

**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.