

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TORSIÓN ACCIDENTAL EN ESTRUCTURAS CON
AISLAMIENTO DE BASE**

PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR:

WILLAM DANIEL CHACÓN SIERRA

SANGOLQUÍ, FEBRERO DE 2009

EXTRACTO / ABSTRACT

En el presente estudio se determina el comportamiento de estructuras con aislamiento sísmico de tipo elastomérico y de tipo FPS, cuando se produce variación de rigidez en el sistema de aislamiento y consecuentemente se presenta torsión accidental. Los resultados obtenidos son comparados con propuestas y normativas existentes.

Adicionalmente se realiza una introducción al manejo de la plataforma informática OpenSees, que en la actualidad es una herramienta ampliamente usada en el mundo para el desarrollo de aplicaciones para simulación del comportamiento de sistemas estructurales y geotécnicos, ante acciones sísmicas.

In the present study the behavior of structures with elastomeric isolators and with the Frictional Pendulum System FPS is determined, when stiffness variation takes place in the isolation system and consequently accidental torsion is presented. The obtained results are compared with proposals and normative existent.

Additionally it is carried out an introduction to the handling of the computer platform OpenSees that at the present time is a tool broadly used in the world for simulating the seismic response of structural and geotechnical systems subjected to earthquake actions.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el señor:
CHACÓN SIERRA WILLAM DANIEL como requerimiento parcial a la
obtención del título de **INGENIERO CIVIL**.

Sangolquí, Febrero del 2009

Dr. Ing. Roberto Aguiar F.
DIRECTOR

Ing. Ana Haro B.
CODIRECTORA

REVISADO POR

Ing. Jorge Zúñiga Gallegos

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a **mis padres**, quienes siempre me han apoyado incondicionalmente, y son ejemplo permanente de amor, esfuerzo y dedicación.

A mis hermanos **Viviana, Cristian y Karen**, por quienes siento un amor inmenso y una profunda admiración.

A **Gaby**, quien siempre ha estado a mi lado apoyándome, este camino ha sido maravilloso y lo mejor ha sido recorrerlo junto a ti.

A toda **mi familia** y a las personas que con su ayuda, apoyo y consejo me han alentado siempre a cumplir mis sueños.

Willam Daniel Chacón Sierra.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por llenar mi vida de bendiciones, por permitirme descubrir su bondad a cada instante.

A mi papi Daniel y mi mami Maribel, gracias por su cariño y su confianza, gracias por dedicar gran parte de su vida para hacer de mí una persona de provecho, ustedes siempre han sido la motivación más grande que me ha impulsado para lograr mis metas. Gracias por heredarme el tesoro más valioso que puede dársele a un hijo, amor.

A Gaby, quien desde un inicio compartió este sueño conmigo, no me equivoco al decir que eres la mejor persona que he conocido, gracias por tenderme siempre tu mano desinteresada, gracias por estar a mi lado en todo momento, sobre todo en los momentos difíciles, de corazón, muchas gracias Gabita.

A mi Director **Dr. Roberto Aguiar**, a mi Codirectora **Ing. Ana Haro** y a todos mis profesores, en especial a quienes llevan su tarea mucho más allá de la formación académica y promueven nuestra formación integral, mi sincera gratitud y respeto para el **Ing. Jorge Zúñiga**, quien siempre estuvo presto para ayudarme, con la gentileza y la generosidad que lo distingue.

A todos mis amigos, gracias por los momentos que hemos compartido, gracias por el cariño y el respeto que siempre me han demostrado.

Willam Daniel Chacón Sierra.

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL AISLAMIENTO SÍSMICO

1.1.- GENERALIDADES.....	2
1.2.- PRINCIPIOS DEL AISLAMIENTO SÍSMICO.....	5
1.3.- AISLADORES ELASTOMÉRICOS	11
1.3.1 Estructuras con Aisladores Elastoméricos.....	14
1.4.- AISLADORES TIPO FPS.....	18
1.4.1 Estructuras con Aisladores FPS.....	21
1.5.- JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	24

CAPÍTULO II

REDUCCIÓN DE LOS EFECTOS DE TORSIÓN CON LA INCORPORACIÓN DE AISLADORES DE BASE

2.1.- INTRODUCCIÓN.....	28
2.2.- EXCENRICIDAD ESTÁTICA EN EDIFICIOS CON BASE EMPOTRADA	28
2.2.1 Centro de Masa.....	28
2.2.2 Centro de Rigidez.....	29
2.3.- TORSIÓN ACCIDENTAL EN EDIFICIOS CON BASE EMPOTRADA.....	32
2.4.- AMPLIFICACIÓN TORSIONAL (INDICADOR Γ).....	34

CAPÍTULO III

TORSIÓN ACCIDENTAL POR EFECTO DE VARIACIÓN DE RIGIDEZ EN AISLADORES ELASTOMÉRICOS

3.1.-TORSIÓN ACCIDENTAL EN EDIFICIOS CON AISLADORES ELASTOMÉRICOS.....	46
3.2.- INVESTIGACIONES REALIZADAS.....	47
3.3.- VARIACIÓN DE LA RIGIDEZ EN LOS AISLADORES.....	50
3.4.- RESULTADOS OBTENIDOS.....	55
3.5.- INCORPORACIÓN DE LA VARIACIÓN DE RIGIDEZ EN NORMATIVA SÍSMICA.....	60

CAPÍTULO IV

TORSIÓN ACCIDENTAL POR EFECTO DE VARIACIÓN DE CARGA NORMAL SOBRE AISLADORES FPS

4.1.- INTRODUCCIÓN.....	65
4.2.- ESTUDIOS REALIZADOS.....	68
4.3.- ANÁLISIS FÍSICO DEL PROBLEMA.....	70
4.4.- MODELO EMPLEADO EN EL ANÁLISIS.....	74
4.5.- VARIACIÓN DE LA CARGA AXIAL.....	75
4.5.1 Resultados Obtenidos.....	82
4.6.- NORMATIVA SÍSMICA.....	86

CAPITULO V

USO DE OPENSEES

5.1.- INTRODUCCIÓN.....	90
5.2.- INSTALACIÓN.....	92
5.2.1 Instalación desde un dispositivo de almacenamiento Extraíble.....	93
5.2.2 Instalación desde Internet (recomendada).....	96
5.3.- INGRESO DE COMANDOS OPENSEES – TCL.....	99
5.3.1 Interactivo.....	99
5.3.2 Ejecutar el archivo de entrada desde el prompt de OpenSees.....	100
5.3.3 Ejecutar el archivo de entrada desde TCL Editor.....	102
5.4.- MANUAL DE USUARIO DE OPENSEES.....	103
5.4.1 Creación del Modelo	105
5.4.2 Definición de archivos de salida (Recorder).....	123
5.4.3 Definición de cargas.....	124
5.4.4 Definición del Análisis.....	125
5.5.- ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURAS CON AISLADORES DE BASE USANDO OPENSEES.....	128
5.6.- EJEMPLOS.....	129
5.6.1 Ejemplo 1.....	130
5.6.2 Ejemplo 2.....	135
5.6.3 Ejemplo 3.....	142
5.6.4 Ejemplo 4.....	151
5.6.5 Ejemplo 5.....	158

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1.- CONCLUSIONES.....	170
6.2.- RECOMENDACIONES.....	173

LISTADO DE TABLAS

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN AL AISLAMIENTO SÍSMICO

Tabla 1.1 Propiedades de aisladores LRB (Algasism).....	14
--	----

CAPITULO III

TORSION ACCIDENTAL POR EFECTO DE VARIACIÓN DE RIGIDEZ EN AISLADORES ELASTOMÉRICOS

Tabla 3.1 Características de los edificios analizados.....	52
Tabla 3.2 Propiedades dinámicas de sistema de aislación para planta cuadrada de 3 pisos.....	58

CAPITULO IV

TORSIÓN ACCIDENTAL POR EFECTO DE VARIACIÓN DE CARGA NORMAL SOBRE AISLADORES FPS

Tabla 4.1 Características de los edificios analizados.....	75
---	----

LISTADO DE FIGURAS

CAPITULO I

INTRODUCCION

Figura 1.1	Comportamiento de una estructura sin aislamiento de base (a) y con aislamiento de base (b).....	8
Figura 1.2	Espectro de aceleración para razones de amortiguamiento de $\xi = 5, 10$ y 15%	9
Figura 1.3	Espectro de aceleración sismo de México valor de $\xi = 5\%$	10
Figura 1.4	Detalle de un aislador elastomérico.....	11
Figura 1.5	Ensayo de un Aislador en el Laboratorio de Dinámica Estructural de la Universidad Católica (Chile).....	13
Figura 1.6	Los Angeles City Hall.....	15
Figura 1.7	San Francisco City Hall, California, USA.....	16
Figura 1.8	Hospital de la Universidad de Kyorin.....	17
Figura 1.9	Edificio del Hospital Militar.....	18
Figura 1.10	Detalle de un aislador tipo FPS.....	19
Figura 1.11	Aislador FPS en posición hacia abajo (a) y hacia arriba (b).....	20
Figura 1.12	Pasadena City Hall, California.....	22
Figura 1.13	Aeropuerto Internacional de San Francisco.....	23
Figura 1.14	Mills - Peninsula Health Services New Hospital.....	23
Figura 1.15	Modelo del puente Bahía de Caráquez –San Vicente.....	24

CAPITULO II

REDUCCIÓN DE LOS EFECTOS DE TORSIÓN CON LA INCORPORACIÓN DE AISLADORES DE BASE

Figura 2.1	Centro de Masa CM.....	29
Figura 2.2	Centro de Rigidez CR.....	30
Figura 2.3	Ejemplo para cálculo de indicador Γ , $r=0.5$	34
Figura 2.4	Ejemplo para cálculo de indicador Γ , $r=0.75$	35
Figura 2.5	Acelerograma sismo Perú (1974) y de Chile (1985).....	36
Figura 2.6	Acelerograma para perfil S2 y 2xCentro.....	36
Figura 2.7	Acelerograma para perfil S1.....	37
Figura 2.8	Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Perú (izquierda) y sismo de Chile (derecha), $r=0.5$...	38
Figura 2.9	Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S2 y sismo de 2xCentro, $r=0.5$	38
Figura 2.10	Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S1, $r=0.5$	38

Figura 2.11	Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Perú y sismo de Chile (derecha), $r=0.75$	39
Figura 2.12	Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S2 y sismo de 2xCentro, $r=0.75$	39
Figura 2.13	Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S1, $r=0.75$	39
Figura 2.14	Respuestas de deformación en el CM y en los bordes. Estructura aislada de un piso ante sismo (2xcentro).....	42
Figura 2.15	Respuestas de deformación en el CM y en los bordes. Estructura base fija de un piso ante sismo (2xcentro).....	43

CAPITULO III

TORSION ACCIDENTAL POR EFECTO DE VARIACIÓN DE RIGIDEZ EN AISLADORES ELASTOMÉRICOS

Figura 3.1	Identificación de los aisladores de base.....	49
Figura 3.2	Geometría de edificio de 3 pisos, $r = 1$	51
Figura 3.3	Geometría de edificio de 3 pisos con $r=0.75$	52
Figura 3.4	Geometría de un aislador.....	54
Figura 3.5	Acelerograma utilizado en el estudio.....	54
Figura 3.6	Caso 1, $e = 0.01^* B$	55
Figura 3.7	Caso 2, $e = 0.02^* B$	55
Figura 3.8	Caso 3, $e = 0.03^* B$	56
Figura 3.9	Caso 4, $e = 0.04^* B$	56
Figura 3.10	Caso 5, $e = 0.05^* B$	56
Figura 3.11	Caso 6, $e = 0.06^* B$	57
Figura 3.12	Relación de desplazamiento en el borde con respecto al CM, en edificios de 3 y 6 pisos, $r=1$	59
Figura 3.13	Relación de desplazamiento en el borde con respecto al CM, en edificios de 3 y 6 pisos, $r=0.75$	59
Figura 3.14	Relación de desplazamiento en el borde con respecto al CM, en edificios de 3 y 6 pisos, $r=0.5$	59

CAPITULO IV

TORSIÓN ACCIDENTAL POR EFECTO DE VARIACIÓN DE CARGA NORMAL SOBRE AISLADORES FPS

Figura 4.1	Modelo de histéresis de un aislador FPS.....	65
Figura 4.2	Detalle de un aislador FPS.....	67
Figura 4.3	Estructura con cargas gravitacionales.....	71
Figura 4.4	Estructura con cargas gravitaciones y acción dinámica.....	71
Figura 4.5	Variación de carga axial sobre los elementos ante la acción de cargas gravitatorias y acciones dinámicas.....	72

Figura 4.6	Historia de reacciones en el apoyo exterior.....	73
Figura 4.7	Estructura con FPS.....	74
Figura 4.8	Modelo considerado en el análisis.....	75
Figura 4.9	Geometría de edificio de 3 pisos con $r=0.5$	76
Figura 4.10	Geometría de edificio de 6 pisos con $r=0.5$	77
Figura 4.11	Acelerograma para perfil S1 y para perfil S2	79
Figura 4.12	Acelerograma para perfil S3 y para perfil S4.....	79
Figura 4.13	Planta tipo, nomenclatura y dirección de los sismos actuantes.....	80
Figura 4.14	Variación del CR, del sistema de aislamiento para una relación de aspecto igual a 1.....	81
Figura 4.15	Variación del CR, del sistema de aislamiento para una relación de aspecto igual a 0.5.....	82
Figura 4.16	Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 3 pisos y $r = 1$	83
Figura 4.17	Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 3 pisos y $r = 0.5$	83
Figura 4.18	Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 6 pisos y $r = 1$	83
Figura 4.19	Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 6 pisos y $r = 0.5$	84
Figura 4.20	Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera. 3 pisos $r=1$	85
Figura 4.21	Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera, 3 pisos y $r = 0.5$	85
Figura 4.22	Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera, 6 pisos y $r = 1$	86
Figura 4.23	Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera, 6 pisos y $r = 0.5$	86

CAPITULO V

USO DE OPENSEES

Figura 5.1	Carpeta con archivos para instalación.....	93
Figura 5.2	Archivo ActiveTcl 8.4.6.1.....	94
Figura 5.3	Cambio de directorio a C:\Program Files \Tcl.....	95
Figura 5.4	Ventana de OpenSees.....	96
Figura 5.5	Ventana de inicio de la página de OpenSees.....	97
Figura 5.6	Ventana para registro.....	97
Figura 5.7	Ventana para descarga de archivos.....	98
Figura 5.8	Archivos guardados en C:\OpenSees.....	99
Figura 5.9	Ingreso Interactivo de comandos en OpenSees.....	100
Figura 5.10	Archivo Tcl generado en Bolc de notas.....	101
Figura 5.11	Ventana de inicio de la página de OpenSees.....	101
Figura 5.12	Ventana de TclEditor.....	103
Figura 5.13	Diagrama Esfuerzo – Deformación Elastic Material.....	110
Figura 5.14	Diagrama Esfuerzo – Deformación Elastic Perfectly	

	Plastic Material.....	111
Figura 5.15	Diagrama Esfuerzo – Deformación Concrete01.....	112
Figura 5.16	Diagrama Esfuerzo – Deformación Steel01.....	114
Figura 5.17	Sección tipo Fibra.....	117
Figura 5.18	Rigidez Efectiva y Diagrama Fuerza – Deformación para material Elastic.....	129
Figura 5.19	Pórtico Ejemplo 1.....	130
Figura 5.20	Acciones consideradas para ejemplo 1.....	131
Figura 5.21	Historia de desplazamientos nudo 3 (GDL 1), formato txt....	134
Figura 5.22	Historia de desplazamientos nudo 3 (GDL 1).....	135
Figura 5.23	Pórtico Ejemplo 2.....	135
Figura 5.24	Acciones consideradas Ejemplo 2.....	136
Figura 5.25	Estructura Ejemplo 3.....	142
Figura 5.26	Nudos y elementos Ejemplo 3.....	143
Figura 5.27	Comparación de resultados Baserigidanew y OpenSees.....	151
Figura 5.28	Columna de Ejemplo 4.....	152
Figura 5.29	Acciones consideradas Ejemplo 4.....	152
Figura 5.30	Desplazamientos del sistema de aislamientos y la Superestructura.....	157
Figura 5.31	Estructura con aislamiento sísmico de base Ejemplo 5.....	158
Figura 5.32	Comparación resultados Masacorregida - OpenSEES.....	166

CAPITULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Figura 6.1	Modelo de tres grados de libertad por nudo.....	174
-------------------	---	-----