



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL.

# VERIFICACIÓN DE LA EFICIENCIA DE SISTEMAS DE AISLAMIENTO PASIVO EN EL MOVIMIENTO DE ROTACIÓN DE CUERPOS RÍGIDOS

Edinson René Guzmán Medina

Profesor Guía : Claudio Andrés Oyarzo Vera

Profesor Informante : Nelson Eduardo Maureira Carsalade

Memoria para optar al título de  
Ingeniero Civil

Concepción - Chile  
Noviembre 2015

# AGRADECIMIENTOS

Como era de esperarse, el presente trabajo requirió de mucho esfuerzo por parte del autor. Sin embargo, es necesario agradecer el apoyo en la resolución de dudas, facilitación de información y datos relevantes durante el estudio, al profesor Claudio Oyarzo, quién fue guía del trabajo, y sin su orientación no habría sido posible el desarrollo de la presente tesis. De igual forma se debe agradecer al profesor informante Nelson Maureira, quién siempre estuvo dispuesto a resolver inquietudes y dudas durante el transcurso de la tesis.

## TABLA DE CONTENIDOS

	Páginas
Agradecimientos	I
Tabla de Contenidos	II
Índice de Figuras	IV
Índice de Tablas	VIII
1. Introducción.....	1
1.1. General.....	1
1.2. Revisión Bibliográfica .....	4
1.3. Hipótesis y Objetivos.....	6
1.3.1. Hipótesis .....	6
1.3.2. Objetivo principal .....	6
1.3.3. Objetivos secundarios.....	6
2. Modelamiento de Cuerpos Rígidos .....	7
2.1. Elementos Considerados como Cuerpos Rígidos.....	7
2.2. Respuesta Dinámica de Cuerpos Rígidos .....	8
2.3. Representación Matemática del Fenómeno de Rotación de Cuerpos Rígidos .....	11
2.3.1. Movimiento de rotación libre .....	11
2.3.2. Movimiento de rotación forzado .....	16
2.4. Cuerpos Rígidos Irregulares y Equivalentes.....	20
2.5. Validación del Modelo .....	22
3. Respuesta Dinámica de Cuerpos Rígidos Frente a Excitaciones Armónicas .....	23
3.1. General .....	23
3.2. Evaluación del Efecto de Esbeltez en Cuerpos Rígidos Simétricos .....	25
3.3. Evaluación del Factor de Escala en Cuerpos Rígidos Simétricos .....	27
3.4. Evaluación del Periodo de la Excitación en Cuerpos Rígidos Simétricos.....	32
3.5. Resumen de Resultados .....	35

3.6. Cuerpos Rígidos Asimétricos .....	37
4. Respuesta Dinámica de Cuerpos Rígidos Frente a Aceleraciones Registradas.....	40
4.1. General .....	40
4.2. Respuesta de Cuerpos Rígidos Frente a Sismos Registrados .....	42
4.2.1. El Centro Imperial Valley, USA .....	42
4.2.2. Lucerne Landers, USA .....	44
4.2.3. Duzce, Turquía .....	47
4.2.4. Chi-Chi, Taiwán.....	50
4.2.5. Convict Creek, USA .....	52
4.2.6. Izmit Kocaeli, Turquía.....	55
4.3. Resumen de Resultados.....	58
5. Sistema de Protección para Cuerpos Rígidos .....	60
5.1. General .....	60
5.2. Sistema de Aislamiento.....	61
5.2.1. Ecuaciones del movimiento.....	61
5.2.2. Respuesta de sistemas con aislación.....	65
5.3. Registro de Aceleraciones Concepción 27 / F.....	73
6. Resumen y Conclusiones .....	76
6.1. Resumen.....	76
6.2. Conclusión .....	77
REFERENCIAS.....	80
ANEXO .....	81
A. Determinación de las Frecuencias Predominantes Mediante la Transformada Rápida de Fourier.....	82
B. Comportamientos Adquiridos por los Cuerpos Rígidos al Ser Sometidos a los Registros de Sismos Históricos.....	86

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Volcamiento de equipamiento eléctrico estación Sylmar Converter, después del terremoto de San Fernando en 1971. (PEER Center, University of California, Berkeley). ..	2
Figura 1.2. Volcamiento de tren en San Francisco en estación Point Reyes durante el terremoto de San Francisco de 1906 (Roy D. Graves Collection). .....	2
Figura 2.1. Diversos cuerpos que pueden ser considerados como cuerpos rígidos. ....	7
Figura 2.2. Deslizamiento de un cuerpo sobre una superficie rígida. ....	8
Figura 2.3. Rotación de cuerpo sobre vértice izquierdo. ....	9
Figura 2.4. Rebote del cuerpo. ....	9
Figura 2.5. Movimiento combinado de deslizamiento y rotación de un cuerpo. ....	10
Figura 2.6. Modelo rectangular (a) Reposo y (b) Fase de rotación. (Adaptación, Housner, 1963). ....	11
Figura 2.7. Cuerpo rígido en rotación libre desplazado un ángulo de rotación $\theta_0^+$ desde el reposo (Elaboración propia). ....	12
Figura 2.8. Respuesta de cuerpo rígido en rotación libre sin pérdida de energía. ....	14
Figura 2.9. Etapas de rotación de cuerpo rígido. a) Reposo, b) Rotación, c) Excedencia del ángulo crítico de rotación. ....	14
Figura 2.10. Respuesta de cuerpo rígido en rotación libre considerando coeficiente de restitución. ....	16
Figura 2.11. Cuerpo rígido excitado por una aceleración basal a) Reposo, b) Fase de rotación. ....	17
Figura 2.12. Geometría y respuesta de un cuerpo en rotación forzada. ....	19
Figura 2.13. Identificación de los parámetros planteados por Housner en un cuerpo irregular. ....	20
Figura 2.14. Diferentes formas de rotación de cuerpos irregulares. ....	21
Figura 2.15. Rotación de cuerpo rígido de 2 m de altura y 0.5 m de ancho sometido a excitaciones armónicas, modelo desarrollado por Vassiliou y Makris. ....	22
Figura 2.16. Rotación de cuerpo rígido de 2 m de altura y 0.5 m de ancho sometido a excitaciones armónicas, modelo desarrollado para esta tesis. ....	22
Figura 3.1. Respuesta de cuerpo rígido de 4 m de altura por 1 m de ancho excitado por aceleración sinusoidal. a) Curva de volcamiento sin impactos en la base, b) Curva de volcamiento después de un impacto en la base, c) No se produce volcamiento. ....	24
Figura 3.2. Cuerpo rígido excitado por pulso Ricker con periodo 1.5 (s). a) Esbeltez 2, b) Esbeltez 4. ....	25
Figura 3.3. Cuerpo rígido excitado por onda sinusoidal con periodo 1 (s). a) No se produce volcamiento, b) Volcamiento después de un impacto. ....	26
Figura 3.4. Curva de volcamiento para cuerpos con esbelteces 2, 3 y 4 sujeto a aceleraciones sinusoidales. a) Periodo de la onda 0.5 (s), b) Periodo de la onda 0.7 (s). ....	26
Figura 3.5. Cuerpos de esbeltez 2.5, con distintas dimensiones. ....	27
Figura 3.6. Respuesta de cuerpo Rígidos frente a onda sinusoidal de periodo 0.5 (s). a) Cuerpo 2.5m x 1m, no se produce volcamiento, b) Cuerpo 1.25m x 0.5m, volcamiento después de un impacto. ....	28

Figura 3.7. Respuesta de cuerpo rígido frente a pulso Ricker con periodo 1.5 (s). a) Cuerpo 2.5m x 1m, no se produce volcamiento, b) Cuerpo 1.25m x 0.5m, volcamiento después de un impacto.....	28
Figura 3.8. Magnitud de las aceleraciones de volcamiento, para cuerpos excitados por aceleración sinusoidal de periodo 1 (s). a) Cuerpo de esbeltez 3, b) Cuerpo de esbeltez 2), c) Cuerpo de esbeltez. 4.....	30
Figura 3.9. Magnitud de las aceleraciones de volcamiento para cuerpos excitados por aceleración sinusoidal de periodo 0.4 (s). a) Cuerpo de esbeltez 3, b) Cuerpo de esbeltez 2), c) Cuerpo de esbeltez 4.....	31
Figura 3.10. Cuerpo rígido simétrico de esbeltez 3. ....	32
Figura 3.11. Cuerpo de dimensiones 3m x 1m excitado por aceleración sinusoidal de amplitud constante. a) Periodo 0.4 (s), b) Periodo 0.5 (s), c) Periodo 0.8 (s), d) Periodo 1(s). ....	33
Figura 3.12. Cuerpo de dimensiones 3m x 1m excitados por aceleraciones tipo pulso Ricker de amplitud constante. a) Periodo 0.5 (s), b) Periodo 1(s), c) Periodo 1.5 (s), d) Periodo 2 (s).....	33
Figura 3.13. Aceleración de volcamiento para cuerpo sometidos a aceleraciones sinusoidales de periodo 0.4 (s), 0.6 (s) y 1 (s). a) Esbeltez 3, b) esbeltez 2), c) esbeltez 4. .	34
Figura 3.14. Resumen de curvas de volcamiento para cuerpos con esbeltez 2. ....	35
Figura 3.15. Resumen de curvas de volcamiento para cuerpos con esbeltez 3. ....	35
Figura 3.16. Resumen de curvas de volcamiento para cuerpos con esbeltez 4. ....	36
Figura 4.1. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2. ....	42
Figura 4.2. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 3 (3m x 1m). a) FA 1.5, b) FA 2. ....	43
Figura 4.3. Cuerpos de esbeltez 3 sometidos a FA 2. a) 3m x 1m (rotación). b) 1.5m x 0.5m (volcamiento).....	43
Figura 4.4. Cuerpos sometidos a un FA 2. a) 3m x 1m (rotación). b) 4m x 1m (volcamiento). c) 5m x 1m (volcamiento). ....	44
Figura 4.5. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2. ....	44
Figura 4.6. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 4 (4m x 1m). a) FA 1, b) FA 1.5. ....	45
Figura 4.7. Cuerpos de esbeltez 4 sometidos a un FA 1.5. a) 4m x 1m (rotación). b) 2m x 0.5m (volcamiento). ....	46
Figura 4.8. Cuerpos sometidos a un FA 1.5. a) 1m x 0.5m (rotación). b) 1.5m x 0.5m (volcamiento). c) 2m x 0.5m (volcamiento). ....	46
Figura 4.9. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2. ....	47
Figura 4.10. Rotación de cuerpo rígido de esbeltez 3 (1.5m x 0.5m). a) FA 1.5, b) FA 2. ....	48
Figura 4.11. Cuerpos de esbeltez 3 sometidos a un FA 1.5. a) 1.5m x 0.5m (rotación). b) 0.9m x 0.3m (volcamiento). ....	49
Figura 4.12. Cuerpos sometidos a FA 2. a) 1m x 0.5m (rotación), b) 1.5m x 0.5m (rotación), c) 2m x 0.5m (volcamiento). ....	49
Figura 4.13. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2. ....	50
Figura 4.14. Rotación de cuerpo rígido de esbeltez 6 (6m x 1m). a) FA 1, b) FA 1.5. ....	51
Figura 4.15. Cuerpos de esbeltez 6 sometidos a FA 1.5. a) 6m x 1m (rotación). b) 3m x 0.5m (volcamiento).....	51
Figura 4.16. Cuerpos sometidos a FA 1.5. a) 4m x 1m (rotación), b) 6m x 1m (rotación), c) 7m x 1m (volcamiento). ....	52

Figura 4.17. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2.....	52
Figura 4.18. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 5 (2.5m x 0.5m). a) FA 1, b) FA 2. ....	53
Figura 4.19. Cuerpos de esbeltez 5 sometidos a FA 2. a) 2.5m x 0.5m (rotación). b) 1m x 0.2m (volcamiento). .....	54
Figura 4.20. Cuerpos sometidos a un FA 2. a) 4m x 1m (rotación). b) 6m x 1m (rotación). c) 7m x 1m (volcamiento). .....	54
Figura 4.21. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2. ....	55
Figura 4.22. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 5 (2.5m x 0.5m). a) FA 1.5, b) FA 2..	56
Figura 4.23. Cuerpos de esbeltez 5 sometidos a FA 2. a) 1m x 0.2m (rotación). b) 0.5m x 0.1 m (volcamiento). .....	56
Figura 4.24. Cuerpos sometidos a FA 1.5. a) 4m x 1m (rotación), b) 6m x 1m (rotación), c) 7m x 1m (volcamiento). .....	57
Figura 4.25. Curvas de volcamiento para los registros analizados. FA 1. ....	59
Figura 4.26. Curvas de volcamiento para los registros analizados. FA 1.5. ....	59
Figura 4.27. Curvas de volcamiento para los registros analizados. FA 2. ....	59
Figura 5.1. a) Cuerpo Rígido en reposo. b) etapa de contacto total. c) etapa de rotación...	61
Figura 5.2. Identificación de las fuerzas actuantes en el sistema durante la etapa de contacto total. ....	61
Figura 5.3. Identificación de las fuerzas actuantes en el sistema cuando el cuerpo rígido rota sobre el aislador. ....	62
Figura 5.4. Registro de Convict, cuerpo de 7m x 1m, periodo de aislación de 2.5 (s), sobre la base fija el cuerpo permanece en rotación y vuelca al estar sobre el aislador.....	71
Figura 5.5. Registro de Lucerme, cuerpo de 4m x 1m, periodo de aislación 2.5 (s), sobre la base fija el cuerpo permanece en rotación, y vuelca al estar sobre el aislador. ....	71
Figura 5.6. Registro de Duzce, cuerpo de dimensiones 5m x 1m, periodo de aislación 3(s), sobre la base fija el cuerpo permanece en rotación y vuelca al estar sobre el aislador. ....	72
Figura 5.7. Registro de aceleraciones, estación Concepción centro, dirección norte- sur. a) FA 1, PGA (0.28g), b) FA 1.5, PGA (0.42g), c) FA 2, PGA (0.57g), c) FA 2.5 PGA (0.73g). .	73
Figura 5.8. Gráfico de las etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre base fija, sujetos a aceleraciones de Concepción. ....	73
Figura 5.9. Gráfico de etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre aislador con periodo de aislación de 2.5 (s), sujeto a las aceleraciones Concepción. ....	74
Figura 5.10. Gráfico de etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre aislador con periodo de aislación de 3 (s), sujeto a las aceleraciones Concepción. ....	74
Figura 5.11. Gráfico de etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre aislador con periodo de aislación de 4 (s), sujeto a las aceleraciones Concepción. ....	75
Figura A.1. En el registro de Concepción se muestra como la frecuencia predominante es 0.5-0.8 Hz aproximadamente. ....	82
Figura A.2. En el registro de Convict Creek se muestra como la frecuencia predominante es 1.35-3.5 Hz aproximadamente. ....	82
Figura A.3. En el registro de El Centro Imperial Valley se muestra como la frecuencia predominante es 0.5-1 Hz aproximadamente. ....	83
Figura A.4. En el registro de Chi-Chi Se muestra como la frecuencia predominante es 0.5-1.5 Hz aproximadamente. ....	83

Figura A.5. En el registro de Duzce se muestra como la frecuencia predominante es 1.3-2.5 Hz aproximadamente. ....	84
Figura A.6. En el registro de Lucerne Landers se muestra como la frecuencia predominante es 8-12 Hz aproximadamente. ....	84
Figura A.7. En el registro de Izmit Kocaeli se muestra como la frecuencia predominante es 5-7 Hz aproximadamente. ....	85

## INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores de coeficientes de restitución típicos. ....	16
Tabla 3.1. Diferentes configuraciones de cuerpos simétricos en altura total por base total y su correspondiente parámetro de frecuencia. ....	30
Tabla 4.1. Dimensiones en metros de los cuerpos rígidos analizados durante el capítulo. .	40
Tabla 4.2. Registro de aceleraciones sin modificación de intensidad. ....	41
Tabla 4.3. Registros de aceleraciones con modificación de intensidad. ....	41
Tabla 4.4. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de El Centro. ....	42
Tabla 4.5. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de El Centro. ....	42
Tabla 4.6. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de El Centro. ....	43
Tabla 4.7. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Lucerne. ....	44
Tabla 4.8. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Lucerne. ....	45
Tabla 4.9. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Lucerne. ....	45
Tabla 4.10. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Duzce. ....	47
Tabla 4.11. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Duzce. ....	47
Tabla 4.12. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Duzce. ....	48
Tabla 4.13. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Chi-Chi. ....	50
Tabla 4.14. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Chi-Chi. ....	50
Tabla 4.15. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Chi-Chi. ....	50
Tabla 4.16. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Convict. ....	52
Tabla 4.17. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Convict. ....	53
Tabla 4.18. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Convict. ....	53
Tabla 4.19. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Izmit. ....	55
Tabla 4.20. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Izmit. ....	55
Tabla 4.21. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Izmit. ....	56
Tabla 5.1. Registro de aceleraciones sin modificación de intensidad. ....	65
Tabla 5.2. . Registro de aceleraciones con modificación de intensidad. ....	66
Tabla 5.3. Respuesta del cuerpo de esbeltez 2 (2m x 1m), sin modificación de intensidad (O), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento. ....	66
Tabla 5.4. Respuesta del cuerpo de esbeltez 3 (3m x 1m), sin modificación de intensidad (O), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento. ....	67
Tabla 5.5. Respuesta del cuerpo de esbeltez 4 (4m x 1m), sin modificación de intensidad (O), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento. ....	68
Tabla 5.6. Respuesta del cuerpo de esbeltez 5 (5m x 1m), sin modificación de intensidad (O), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento. ....	68
Tabla 5.7. Respuesta del cuerpo de esbeltez 6 (6m x 1m), sin modificación de intensidad (O), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento. ....	69
Tabla 5.8. Respuesta del cuerpo de esbeltez 7 (7m x 1m), sin modificación de intensidad (O), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento. ....	70
Tabla B.1. El Centro Imperial Valley, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros). ....	87

Tabla B.2. El Centro Imperial Valley, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros). .....	87
Tabla B.3. El Centro Imperial Valley. Cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros). .....	87
Tabla B.4. Convict Creek, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros). ....	88
Tabla B.5. Convict Creek, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros). ..	88
Tabla B.6. Convict Creek, Cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros). .....	88
Tabla B.7. Duzce, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros). .....	89
Tabla B.8. Duzce, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros). .....	89
Tabla B.9. Duzce, cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros). .....	89
Tabla B.10. Lucerne, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros). .....	90
Tabla B.11. Lucerne, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros). .....	90
Tabla B.12. Lucerne, cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros). ..	90
Tabla B.13. Izmit, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros). .....	91
Tabla B.14. Izmit, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros). .....	91
Tabla B.15. Izmit, cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros). .....	91
Tabla B.16. Chi-Chi, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros). .....	92
Tabla B.17. Chi-Chi, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros). .....	92
Tabla B.18. Chi-Chi, cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros). ....	92

# 1. Introducción

## 1.1. General

En Chile actualmente existen diferentes normativas que rigen el diseño sísmoresistente (NCH 433, NCH 2369, NCH 2745), estas normas son actualizadas periódicamente o se establecen decretos de emergencia que modifican alguno de sus puntos que se hayan observado deficientes durante un evento sísmico. Sin embargo, se presta muy poca atención a los elementos secundarios no estructurales, tales como equipo médico, maquinaria y obras de arte, aun cuando el daño de estos objetos puedan dejar inoperativa cierta estructura en la cual se encuentran contenidos o puedan representar un potencial daño a quienes la habiten, sin mencionar, el valor histórico, artístico o social que el daño de este tipo de elementos puede representar. Este tipo de elementos al no estar anclados a la superficie de soporte, se mueve como cuerpo rígido, si bien el cuerpo rígido es una idealización de la cinemática ya que todos los cuerpos que son afectados por fuerzas externas experimentan cambios relativos en sus partículas, estudiar este tipo de elementos bajo este supuesto es una buena aproximación, debido a que se encuentran escasamente anclados a la base y presentan problemas de estabilidad, es por esto que se considera que el movimiento es común para cada una de las partículas que lo componen. Este tipo de cuerpos puede experimentar comportamientos tales como deslizamiento, rotación o la combinación de ambos durante la ocurrencia de fenómenos telúricos.

En la Figura 1.1 y 1.2 se muestran ejemplos históricos de volcamientos de cuerpos rígidos debido a la acción de sismos. El estudio del comportamiento de estos cuerpos se inició formalmente en la década del 60 después del terremoto de Chile, cuando George W. Housner observó que las estructuras altas y esbeltas tenían un mejor comportamiento que las estructuras de menor tamaño y de esbelteces menores.

En la presente tesis se estudia el comportamiento de rotación de cuerpos rígidos, ya que se asume un coeficiente de fricción entre el suelo y el cuerpo lo suficientemente grande para que el cuerpo no deslice, además no se consideran aceleraciones verticales del terreno.

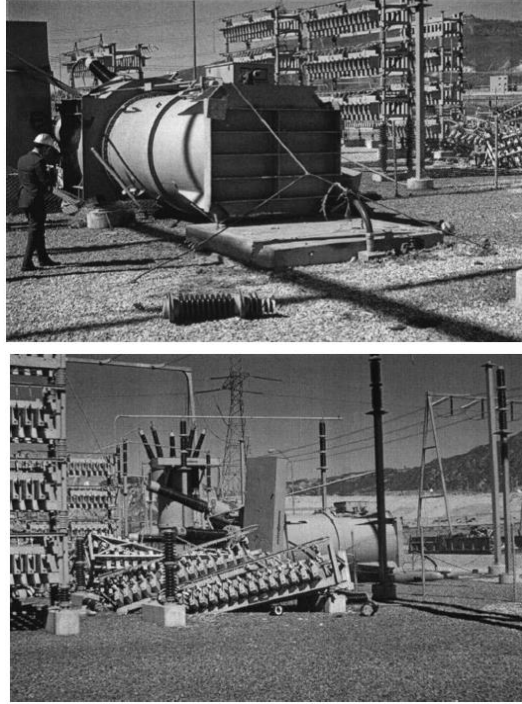


Figura 1.1. Volcamiento de equipamiento eléctrico estación Sylmar Converter, después del terremoto de San Fernando en 1971. (PEER Center, University of California, Berkeley).

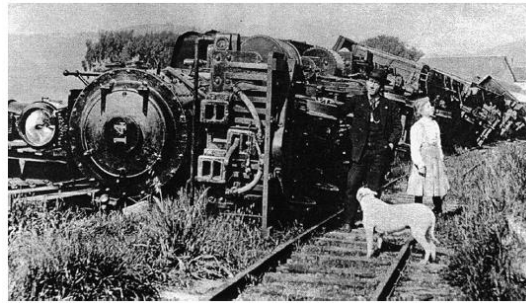


Figura 1.2. Volcamiento de tren en San Francisco en estación Point Reyes durante el terremoto de San Francisco de 1906 (Roy D. Graves Collection).

En trabajos anteriores se ha considerado de gran interés el estudio de la máxima aceleración generada por el movimiento del terreno y la influencia que esta tiene sobre las rotaciones de los cuerpos, pero se le presta poca atención a los periodos que esta aceleración desarrolla y la influencia sobre los cuerpos rígidos, así como también a los niveles de asimetría que puede tener un cuerpo y que podría ser perjudicial desde el punto de vista de amplificar las rotaciones e incluso haciendo que alcance antes el volcamiento. Es por esto que en la presente tesis se evaluará la

influencia del periodo de la excitación sobre las rotaciones de los cuerpos rígidos y se establecerá un dispositivo de aislamiento pasivo tipo M-K-C (masa-resorte-amortiguador), para reducir la magnitud de las aceleraciones que experimentan los cuerpos. Además se evaluará la efectividad de este tipo de dispositivo para ser usado como protección sísmica en cuerpos rígidos, para prevenir el fenómeno de volcamiento

## 1.2. Revisión Bibliográfica

El precursor de estudios de movimiento de cuerpos rígidos fue Housner (1963), quien caracterizó el comportamiento de cuerpos rígidos simétricos en rotación. En sus estudios sometió a los cuerpos a diferentes tipos de excitaciones, como excitaciones constantes, armónicas y de terremotos, planteando las ecuaciones que describen el comportamiento de rotación de cuerpos rígidos bajo estas sollicitaciones. Sus estudios sentaron las bases del análisis de rotación de cuerpos rígidos y logró describir la pérdida de energía en el fenómeno de rotación del cuerpo al impactar con la base que lo soporta, estableciendo un modelo matemático que describe la rotación de cuerpos rígidos. Aun cuando Housner realizó grandes aportes al estudio del fenómeno de rotación de cuerpos rígidos, no realizó estudios con respecto a los movimientos restantes que estos cuerpos pueden adquirir, sin embargo, Ishiyama (1983) en sus estudios consideró los movimientos de deslizamiento, rebote y la combinación de estos en cuerpos rígidos simétricos, estableciendo las magnitudes de las aceleraciones por las que el cuerpo debe ser afectado para iniciar un tipo de movimiento o cambiar de una fase de movimiento a otra, usando en su análisis señales armónicas y registros de aceleraciones sísmicas. Zhang y Makris (1999), basados en los estudios de Housner e Ishiyama estudiaron el movimiento de rotación de cuerpos rígidos simétricos excitándolos con señales armónicas, estableciendo dos tipos de falla en los cuerpos, la primera cuando los cuerpos vuelcan sin impactar en la base que los soporta y la segunda, cuando vuelcan después de impactar una o más veces en la base. De esta forma lograron establecer zonas de seguridad, relacionando las frecuencias de las aceleraciones que excitan a los cuerpos, con los máximos peaks de las mismas. Chile no está ajeno a este tipo de estudios pues Boroshek e Iruretagoyena (2000), estudiaron el movimiento de rotación de cuerpos rígidos simétricos realizando análisis numéricos y experimentales, pensando en la protección de equipos médicos. Establecieron una base inclinada, con la intención de conocer previamente a que el cuerpo fuera afectado por sollicitaciones externas el lugar hacia donde el cuerpo volcaría y de esta forma proteger ese lugar de modo de evitar daños en el cuerpo una vez que vuelque, logrando así una forma de protección para cuerpos rígidos en rotación. Por otro lado, otro tipo de dispositivo de protección es el planteado por Calio y Marletta (2004), quienes diseñaron un dispositivo de aislamiento pasivo de un grado de libertad del tipo M-K-C (masa, resorte, amortiguador), para evaluar la respuesta de cuerpos rígidos simétricos en rotación como vasijas griegas y esculturas de forma humana, considerando siempre en sus análisis que tanto la base como el cuerpo son rígidos. Comúnmente se ha estudiado este fenómeno considerando rígidos tanto el cuerpo como la base que lo soporta, sin embargo, Apostolou et al (2006) estudiaron el movimiento de rotación de cuerpos rígidos

simétricos sometidos a excitaciones armónicas y acelerogramas registrados, estableciendo una base de soporte rígida y otra elástica, encontrando amplificaciones aleatorias en la respuesta de rotación de los cuerpos sobre la base elástica. La mayoría de los estudios han desarrollado sólo modelos numéricos para encontrar la respuesta de los cuerpos rígidos, sin embargo resulta interesante realizar ensayos experimentales, para comprobar la validez de las ecuaciones que definen los comportamientos de los cuerpos rígidos. Zenteno (2007) realizó estudios numéricos y experimentales del movimiento de rotación de cuerpos rígidos simétricos, enfocándose en los métodos de integración numérica más apropiados para resolver las ecuaciones planteadas por los autores precursores del fenómeno que gobiernan el movimiento de rotación, además realizó modelos a escala basado en el teorema Pi de Buckingham, encontrando resultados poco concordantes entre los ensayos numéricos y experimentales. Investigadores prestigiosos han denominado al comportamiento de cuerpos rígidos como caótico, y uno de los puntos más importantes y discrepantes en la modelación de las ecuaciones es el de la pérdida de energía del cuerpo al impactar en la base, aun cuando la mayoría de los autores mencionados anteriormente utilizan el coeficiente de restitución planteado por Housner (1963) para modelar la pérdida de energía. Schau y Johannes (2013) analizaron el movimiento de rotación y deslizamiento de cuerpos rígidos, pero enfocándose en el momento del impacto de cuerpo con la base que lo soporta, que es donde se disipa la mayor cantidad de energía. Realizaron análisis basados en elementos finitos para obtener la pérdida de energía, encontrando resultados muy similares a los obtenidos por Housner, lo cual validó el uso del coeficiente de restitución como pérdida de energía en el fenómeno de rotación de cuerpos rígidos.

## **1.3. Hipótesis y Objetivos**

### **1.3.1. Hipótesis**

Implementar un sistema de aislamiento pasivo en cuerpos rígidos permite que estos logren soportar de mejor manera las fuerzas generadas por las aceleraciones del terreno. Es decir, si una magnitud de aceleración genera la rotación del cuerpo y posteriormente produce el volcamiento del mismo, cuando se implementa el sistema de aislación, se necesitará una aceleración de mayor magnitud para generar los fenómenos de rotación y volcamiento.

### **1.3.2. Objetivo principal**

Verificar la efectividad de un sistema de aislamiento pasivo en la protección sísmica y estabilidad de cuerpos rígidos.

### **1.3.3. Objetivos secundarios**

Evaluar los efectos del contenido de frecuencias de las aceleraciones generadas en el terreno sobre las magnitudes de las rotaciones de cuerpos rígidos.

Evaluar los efectos de la excentricidad del centro de masa sobre las rotaciones de los cuerpos rígidos.

## 2. Modelamiento de Cuerpos Rígidos

### 2.1. Elementos Considerados como Cuerpos Rígidos

Los cuerpos rígidos son definidos por la cinemática como aquellos cuerpos que no experimentan desplazamientos relativos entre sus partículas cuando sobre ellos actúan fuerzas externas. Es decir, estos cuerpos son indeformables y su comportamiento es común para cada una de las partículas que lo componen. Es claro que esta definición es una idealización, ya que todos los cuerpos experimentan deformaciones cuando fuerzas externas actúan sobre ellos. Sin embargo, estudios han demostrado que cuerpos ubicados al interior de las edificaciones o al aire libre tales como obras de arte, maquinarias, artículos domésticos, equipo médico, etc, al no contar con algún sistema de fundación o anclaje, presentan problemas de estabilidad y pueden ser considerados como cuerpos rígidos suponiendo un comportamiento donde todas las partículas experimentan los mismos cambios en su posición cuando son afectados por fuerzas externas (Figura 2.1).

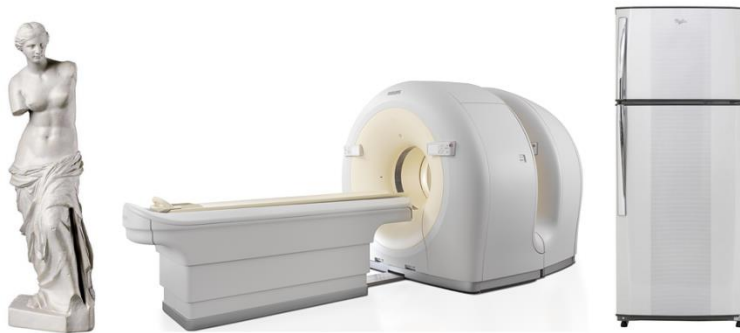


Figura 2.1. Diversos cuerpos que pueden ser considerados como cuerpos rígidos.

## 2.2. Respuesta Dinámica de Cuerpos Rígidos

Los cuerpos rígidos pueden presentar diferentes tipos de comportamientos según sea la excitación que los afecta y las dimensiones geométricas del mismo, las que pueden ser muy variables como se mostró en la Figura 2.1. Estos movimientos pueden ser deslizamiento, balanceo, rebote o una combinación de estos.

**Deslizamiento:** Cuando un cuerpo es afectado por una fuerza horizontal, la cual puede ser generada debido a la acción sísmica del terreno, el cuerpo puede deslizarse sobre la superficie que lo soporta, tal como se muestra en la Figura 2.2.



Figura 2.2. Deslizamiento de un cuerpo sobre una superficie rígida.

**Rotación:** Cuando el cuerpo es afectado por una fuerza horizontal la cual puede ser generada por la acción sísmica del terreno, este puede rotar sobre sus vértices inferiores e incluso, dependiendo de ciertas condiciones, podría volcarse, tal como se muestra en la Figura 2.3.

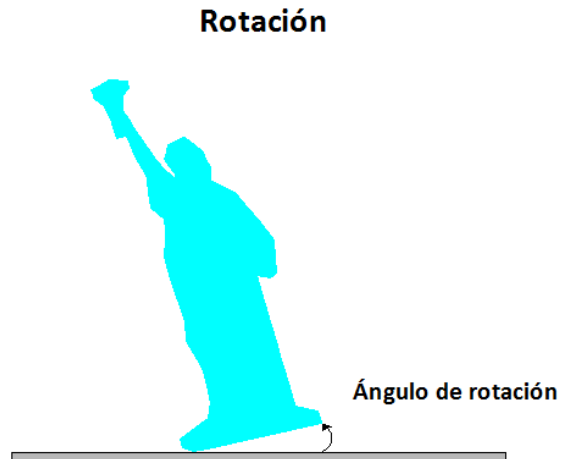


Figura 2.3. Rotación de cuerpo sobre vértice izquierdo.

**Rebote:** Cuando el cuerpo es afectado por una fuerza vertical la cual puede ser generada debido a la componente sísmica vertical del terreno, el cuerpo puede elevarse desde la base que lo soporta y luego volver a caer sobre esta, tal como se muestra en la Figura 2.4.

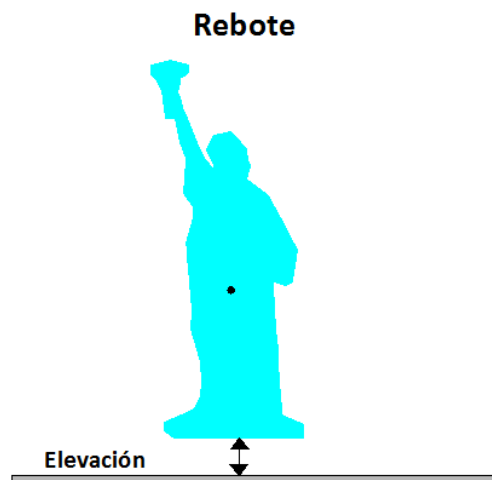


Figura 2.4. Rebote del cuerpo rígido.

**Deslizamiento-balanceo:** Cuando el cuerpo es afectado por una fuerza horizontal la cual puede ser generada por la acción sísmica del terreno, este puede

desplazarse y rotar sobre sus vértices inferiores combinando los movimientos de rotación y deslizamiento descritos anteriormente, tal como se muestra en la Figura 2.5.

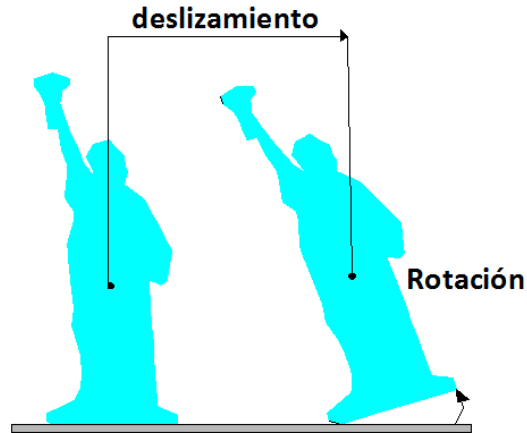


Figura 2.5. Movimiento combinado de deslizamiento y rotación de un cuerpo.

En la presente tesis sólo se analizará la respuesta dinámica de rotación de cuerpos rígidos, ya que se asumió que el coeficiente de fricción base-cuerpo es lo suficientemente grande para impedir que este se deslice. Además no serán consideradas aceleraciones verticales del terreno, por lo tanto el cuerpo no podrá experimentar rebote.

## 2.3. Representación Matemática del Fenómeno de Rotación de Cuerpos Rígidos

El precursor de estudios de cuerpos rígidos fue G. W. Housner [1], quien describió el movimiento de un cuerpo rectangular uniforme en rotación en función de parámetros geométricos y su peso (Figura 2.6). Él planteó las ecuaciones de equilibrio que rigen el comportamiento de rotación de los cuerpos en un modelo en dos dimensiones que aún hoy siguen siendo las más utilizadas.

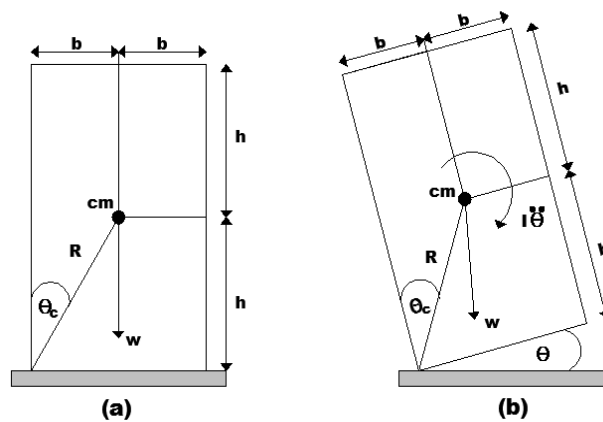


Figura 2.6. Modelo rectangular (a) Reposo y (b) Fase de rotación. (Adaptación, Housner, 1963).

Los parámetros de interés como se muestran en la Figura 2.6 son la ubicación del centro de masa (cm), descrita por la semi altura del cuerpo ( $h$ ) y el semi ancho de la base ( $b$ ), la masa ( $m$ ), la inercia rotacional con respecto a su centro de gravedad ( $I$ ) y al punto de giro ( $I_0$ ), la distancia diagonal ( $R$ ) comprendida entre el centro de masa y los vértices inferiores, el ángulo ( $\theta_c$ ) comprendido entre  $R$  y la vertical y el ángulo de rotación del cuerpo ( $\theta$ ), el cual para efectos de cálculos será considerado positivo cuando el cuerpo rote sobre su vértice izquierdo  $\theta^+$  como se muestra en la Figura 2.6b y negativo cuando rote su vértice derecho  $\theta^-$ .

### 2.3.1. Movimiento de rotación libre

Al igual que el clásico oscilador de un grado de libertad, un cuerpo rígido adquiere un movimiento libre cuando se le proporciona un desplazamiento inicial desde su posición de equilibrio. En el modelo de estudio de cuerpo rígido también

se le puede proporcionar una deformación inicial desde la condición de equilibrio, o más específicamente una rotación inicial respecto a su posición de reposo. En la Figura 2.7 se muestra una rotación inicial  $\theta_0$  según la convención de signos adoptada anteriormente.

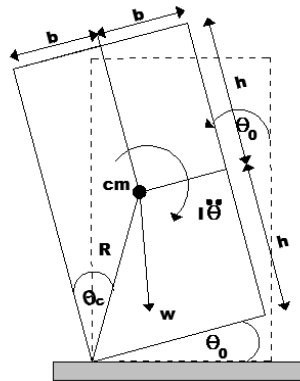


Figura 2.7. Cuerpo rígido en rotación libre desplazado un ángulo de rotación  $\theta_0$  desde el reposo (Adaptación Housner, 1963).

De esta forma cuando el cuerpo es rotado un ángulo  $\theta_0$  el peso del cuerpo genera un momento restituyente y la ecuación que describe el comportamiento cuando el cuerpo rota en torno al vértice izquierdo se puede encontrar tomando momentos en torno al vértice de giro, tal como se muestra en la Figura 2.7, obteniéndose así la ecuación 2.1, que caracteriza la oscilación libre de un cuerpo rígido (Housner, 1963).

$$I \cdot \ddot{\theta} + w \cdot R \cdot \sin(\theta_c - \theta) = 0 \quad (2.1)$$

donde:

W: peso.

R: distancia diagonal desde centro de masa hasta vértice de giro.

$\theta_c$ : ángulo crítico de giro.

$\theta$ : ángulo de giro

I: momento de inercia con respecto al punto de rotación

sujeto a las condiciones iniciales

$$\theta(t_0) = \theta_0$$

$$\frac{d\theta}{dt}(t_0) = 0$$

Liberado desde un ángulo inicial  $\theta_0$ , con una velocidad inicial cero.

La ecuación diferencial que caracteriza las oscilaciones libres del cuerpo es una ecuación diferencial homogénea de segundo orden no lineal, pero puede ser linealizada si se consideran ángulos de rotación pequeños, de manera que  $\sin(\theta)$  se pueda aproximar a  $(\theta)$  y así la ecuación podría resolverse analíticamente. La ecuación 2.1 también puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\ddot{\theta} + w \cdot \frac{R}{I} \cdot \sin(\theta_c - \theta) = 0 \quad (2.2)$$

De esta forma se puede introducir el parámetro  $p = \sqrt{\frac{w \cdot R}{I}}$  el cual tiene unidades de frecuencia, y fue definido por Housner como “el parámetro de frecuencia característica del cuerpo”. Este parámetro no corresponde exactamente a la frecuencia natural del oscilador de un grado de libertad bajo vibración libre. Sin embargo, este parámetro es característico de cada cuerpo. Al introducir este parámetro de frecuencia la ecuación 2.2 adopta la siguiente forma:

$$\ddot{\theta} + p^2 \cdot \sin(\theta_c - \theta) = 0 \quad (2.3)$$

Esta ecuación describe el comportamiento de un cuerpo rígido en oscilación libre cuando el cuerpo está rotando en torno a su vértice izquierdo, mientras que la ecuación 2.4 describe el comportamiento cuando el cuerpo rígido está rotando en torno al vértice derecho.

$$\ddot{\theta} + p^2 \cdot \sin(-\theta_c - \theta) = 0 \quad (2.4)$$

En la Figura 2.8 se muestra la respuesta de un cuerpo rígido simétrico, considerando ambas ecuaciones conjuntamente.

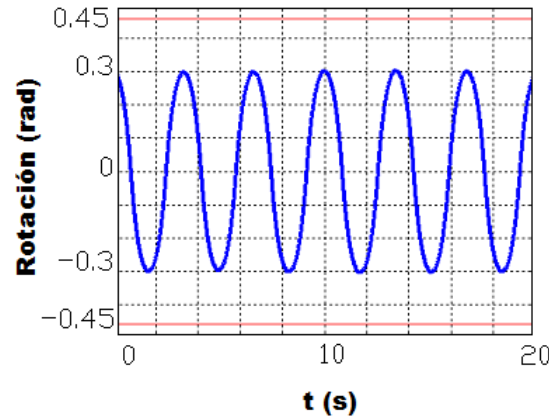


Figura 2.8. Respuesta de cuerpo rígido en rotación libre sin pérdida de energía.

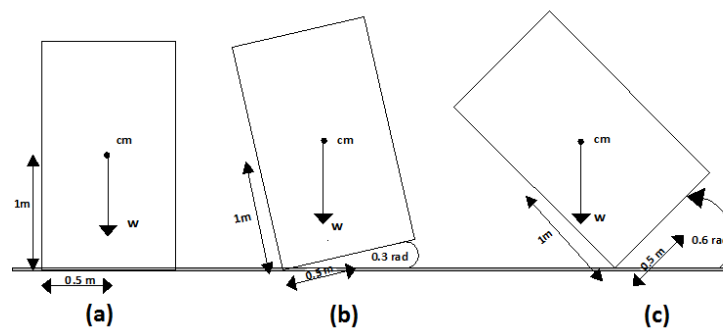


Figura 2.9. Etapas de rotación de cuerpo rígido. a) Reposo, b) Rotación, c) Excedencia del ángulo crítico de rotación.

Se puede observar en la Figura 2.8 que la amplitud de las rotaciones del cuerpo permanecen constantes, descritas por las curvas azules. En este caso se dió un ángulo de rotación inicial de  $0.3 \text{ rad}$  y se mantuvo el movimiento constante indefinidamente mientras se observó el fenómeno. Esto quiere decir que no perdió energía durante dicho lapso de tiempo. Además se puede observar el valor del ángulo de rotación crítico definido por una línea roja en la Figura 2.8 ( $0.45 \text{ rad}$ ) el cual no puede ser sobrepasado, ya que eso implicaría el volcamiento del cuerpo, debido a que el peso no logra ejercer un momento restituyente, situación que además se muestra en la Figura 2.9c. El tipo de fenómenos sin pérdidas de energía en la naturaleza no existe, y para representar adecuadamente el fenómeno se debe buscar la manera de representar esta pérdida de energía, esto se logra mediante el coeficiente de restitución.

Esta pérdida de energía se produce cada cuarto de ciclo, cuando el cuerpo impacta en la superficie que lo soporta. La pérdida de energía fue cuantificada por Housner, basado en la teoría de colisiones de la física, bajo ciertas consideraciones:

- a) La base y el cuerpo son rígidos.
- b) No se produce rebote. Esto quiere decir que el cuerpo al impactar contra la base comienza a rotar en torno a la esquina que impacta. Lo que en general es válido para cuerpo cuya esbeltez supere  $\sqrt{2}$  [14].
- c) El tiempo de impacto es muy corto.

Basado en estos supuestos y realizando una conservación de la cantidad de movimiento antes y después del impacto se obtiene :

$$I \cdot \dot{\theta}(+) = I \cdot \dot{\theta}(-) - 2 \cdot m \cdot b \cdot R \cdot \dot{\theta} - \sin(\theta_c) \quad (2.5)$$

El signo (+) indica la velocidad de rotación del cuerpo antes del impacto y el signo (-) indica la velocidad de rotación del cuerpo después del impacto

De donde se define r como el coeficiente de restitución.

$$\frac{\dot{\theta}(+)}{\dot{\theta}(-)} = r = 1 - \frac{2 \cdot m \cdot R^2 \cdot \sin^2(\theta_c)}{I}$$

Esta ecuación considera entonces un choque inelástico entre el cuerpo y la base que lo soporta, esto quiere decir que se conserva la cantidad de movimiento pero no la energía cinética, la cual será reducida por el factor r cada vez que el cuerpo impacte en la base. Por lo tanto acoplado este nuevo concepto a las ecuaciones del movimiento 2.3 y 2.4 se puede obtener la respuesta del cuerpo rígido como se muestra en la Figura 2.10. Además, se muestra en la Tabla 2.1 los valores típicos coeficientes de restitución para cuerpos simétricos.

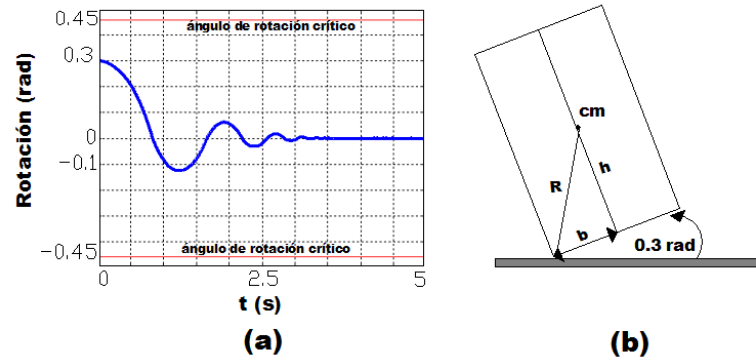


Figura 2.10. Respuesta de cuerpo rígido en rotación libre considerando coeficiente de restitución.

Tabla 2.1. Valores de coeficientes de restitución típicos.

B	H	H/B	r
1	2	2	0.7
1	3	3	0.85
0.375	3	4	0.91
0.25	0.5	2	0.7
0.5	1.5	3	0.85
0.5	2	4	0.91

La respuesta mostrada en la Figura 2.10 es la respuesta de un cuerpo rígido en rotación libre, al cual se le asignó un ángulo de rotación inicial de 0.3 rad. Además se puede observar el ángulo de rotación crítico representado con una línea roja. Se puede observar que cada vez que el cuerpo impacta la base que lo soporta pierde energía y la amplitud del movimiento va disminuyendo progresivamente. En la Tabla 2.1 se puede observar que el coeficiente de restitución se incrementa a medida que se incrementa el valor de la esbeltez.

### 2.3.2. Movimiento de rotación forzado

A diferencia del movimiento libre, en el movimiento forzado el cuerpo está inicialmente en reposo, por lo tanto las nuevas condiciones iniciales serán  $\theta_{(t_0)} = 0$  y  $\dot{\theta}_{(t_0)} = 0$ . Es decir, la posición y la velocidad inicial del cuerpo son cero. Si sobre el cuerpo se aplica una aceleración basal, estas generan una fuerza inercial en el

centro de masa del cuerpo, la magnitud de dicha fuerza dependerá de la magnitud de la aceleración del terreno y de la masa del cuerpo como se muestra en la Figura 2.11.

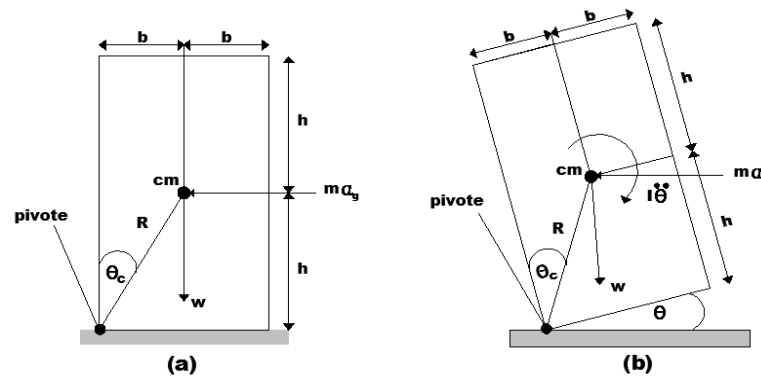


Figura 2.11. Cuerpo rígido excitado por una aceleración basal a) Reposo, b) Fase de rotación (Adaptación Ishiyama, 1983).

Se puede observar en la Figura 2.11(a) que la fuerza externa generada por las aceleraciones provenientes del movimiento del terreno genera un momento volcante sobre el cuerpo ( $M_{ext}$ ), por otro lado el peso del cuerpo genera un momento restituyente ( $M_{rest}$ ). Las siguientes ecuaciones para el momento externo y el restituyente actuantes en el cuerpo fueron planteadas por Housner, y sólo son válidas hasta que el movimiento de rotación del cuerpo es iniciado.

$$M_{ext} = m \cdot a_g \cdot h$$

$$M_{rest} = m \cdot g \cdot b$$

donde

$m$  : masa del cuerpo.

$h$  : distancia desde la base hasta la ubicación del centro de masa.

$b$  : distancia desde la esquina de rotación hasta el centro de masa

$a_g$  : aceleración basal.

Por lo tanto, para que el cuerpo permanezca en la posición de reposo cuando es afectado por una fuerza externa se tiene que cumplir la siguiente relación.

$$M_{rest} > M_{ext} \quad (2.6)$$

es decir,

$$m \cdot g \cdot b > m \cdot a_g \cdot h \quad ; \text{Cuando, } \theta = 0$$

$$g \cdot \frac{b}{h} > a_g \quad (2.7)$$

Por lo tanto para que el movimiento de rotación tenga lugar, la aceleración del terreno debe ser mayor que una fracción de la aceleración de gravedad. Siempre considerando que la altura es como mínimo dos veces más grande que el ancho de la base.

$$g \cdot \frac{b}{h} < a_g \quad (2.8)$$

Cuando esta relación es satisfecha el movimiento de rotación se inicia. Al igual que para el movimiento de oscilaciones libres la ecuación que describe el movimiento se encuentra tomando momentos en torno al punto pivote como se muestra en la Figura 2.11(b), obteniéndose la ecuación 2.9, para el movimiento de rotación forzado cuando  $\theta > 0$  y la ecuación 2.10 cuando  $\theta < 0$  (Yim et al. 1980).

$$I\ddot{\theta} + W \cdot R \cdot \sin(\theta_c - \theta) + a_g \cdot m \cdot R \cdot \cos(\theta_c - \theta) = 0 \quad (2.9)$$

$$I\ddot{\theta} + W \cdot R \cdot \sin(-\theta_c - \theta) + a_g \cdot m \cdot R \cdot \cos(-\theta_c - \theta) = 0 \quad (2.10)$$

sujeto a las condiciones iniciales para velocidad y posición

$$\theta_{t_0} = 0$$

$$\dot{\theta}_{(t_0)} = 0$$

donde

$\theta$  : ángulo de rotación del cuerpo.

$\theta_c$  : ángulo crítico de rotación del cuerpo.

$W$  : peso del cuerpo.

$m$  : masa del cuerpo.

$I$  : inercia del cuerpo con respecto al punto de giro.

$a_g$ : aceleración basal.

Se debe resaltar que las ecuaciones 2.9 y 2.10 no incluyen el efecto de la pérdida de energía del fenómeno, el cual como se explicó anteriormente se produce cuando el cuerpo impacta en la base, es por esta razón que las ecuaciones 2.9 y 2.10 deben ser acopladas con la ecuación 2.5, la cual entrega la pérdida de energía del cuerpo.

En la Figura 2.12(a) se muestra la respuesta forzada, además se hace la distinción entre la respuesta en línea segmentada y continua, ya que en la zona de la respuesta en línea segmentada es durante el tiempo que actúa sobre el cuerpo la excitación.

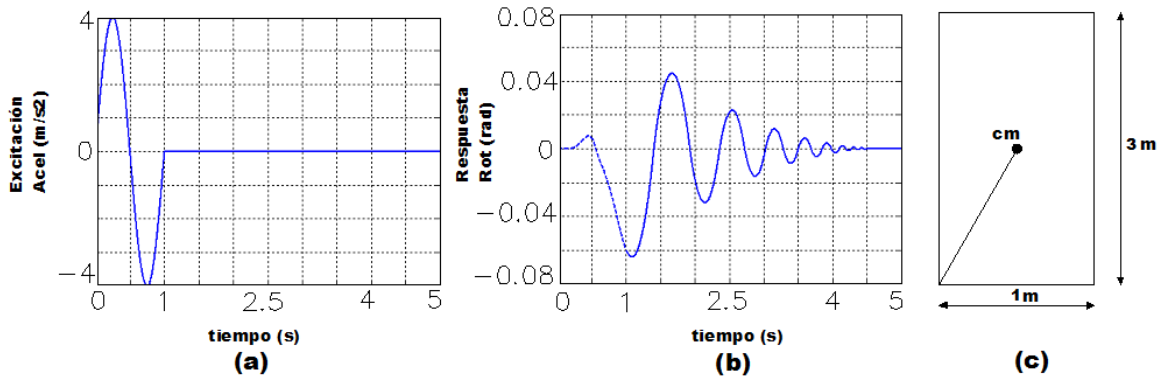


Figura 2.12. Geometría y respuesta de un cuerpo en rotación forzada.

## 2.4. Cuerpos Rígidos Irregulares y Equivalentes

En general los cuerpos rígidos no poseen una forma rectangular o simétrica como la mostrada en la Figura 2.6 modelada por Housner, sino más bien son generalmente irregulares como se muestra en la Figura 2.1. Sin embargo, esto no resulta un problema, ya que en el modelo sólo intervienen los parámetros enunciados anteriormente, por lo tanto aún cuando un cuerpo tenga una forma irregular como la mostrada en la Figura 2.13, este se puede modelar considerando parámetros que serán diferentes cuando el cuerpo gire en torno al vértice izquierdo o al vértice derecho tal como se muestra en la Figura 2.14. Este método se conoce como método de rectángulo equivalente y fue planteado formalmente por Arredondo [13], y permite obtener un cuerpo rígido equivalente que representa a los cuerpos irregulares.

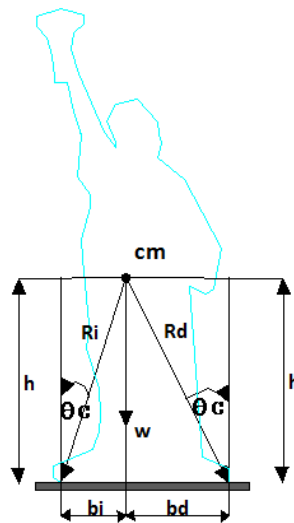


Figura 2.13. Identificación de los parámetros planteados por Housner en un cuerpo irregular, (Adaptación Zenteno, 2007).

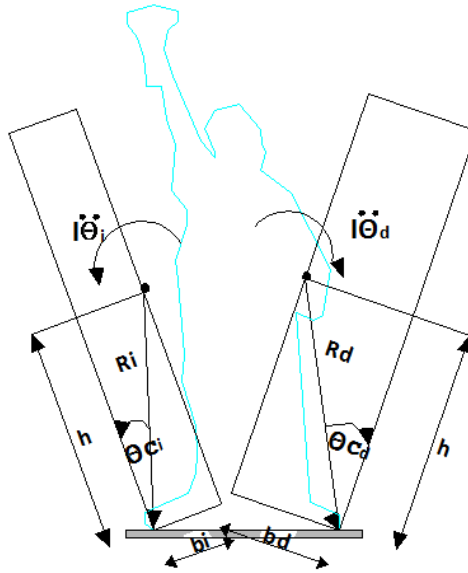


Figura 2.14. Diferentes formas de rotación de cuerpos irregulares (Adaptación Zenteno, 2007).

## 2.5. Validación del Modelo

La resolución de las ecuaciones del movimiento planteadas fueron validadas con los resultados obtenidos por los autores Vassiliou y Makris [9], La Figura 2.16 muestra la implementación de los modelos matemáticos desarrollados para esta tesis, los que coinciden con los resultados obtenidos por los autores antes mencionados, validando el modelo implementado.

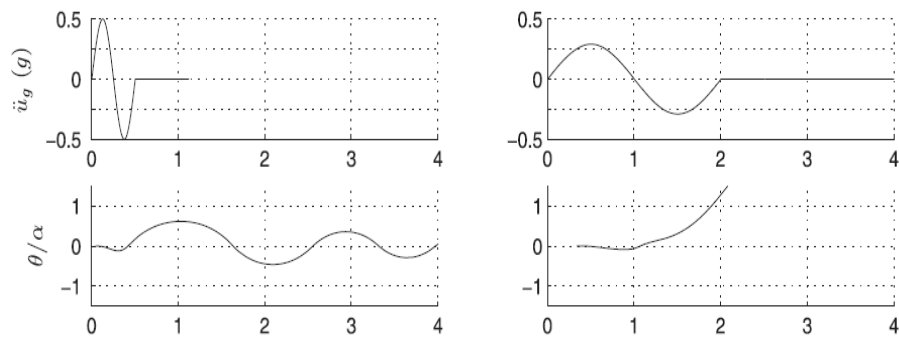


Figura 2.15. Rotación de cuerpo rígido de 2 m de altura y 0.5 m de ancho sometido a excitaciones armónicas, modelo desarrollado por Vassiliou y Makris.

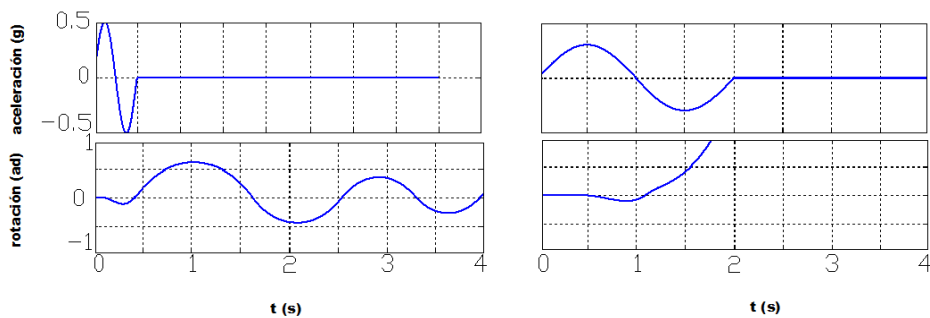


Figura 2.16. Rotación de cuerpo rígido de 2 m de altura y 0.5 m de ancho sometido a excitaciones armónicas, modelo desarrollado para esta tesis.

# 3. Respuesta Dinámica de Cuerpos Rígidos Frente a Excitaciones Armónicas

## 3.1. General

En el presente capítulo se analiza la respuesta de cuerpos rígidos frente a aceleraciones modeladas como ondas armónicas y pulsos Ricker. Los resultados de la modelación fueron obtenidos numéricamente usando las ecuaciones que caracterizan el movimiento (ecuaciones 2.9 y 2.10) desarrolladas en el Capítulo 2, para cuerpos con densidad de  $2000 \frac{kg}{m^3}$  y espesores igual al ancho de la base, integradas mediante el desarrollo de un código en MATLAB, utilizando el algoritmo de Runge-Kutta de 4to orden. Cabe resaltar que el comportamiento de cuerpos rígidos suele denominarse como caótico [11], ya que hasta la fecha no se ha podido conocer previo a realizar los análisis, si dada una determinada excitación el cuerpo sólo rotará sobre sus vértices y regresará a la posición de reposo, o los ángulos de rotación serán tan grandes, que se producirá el colapso del cuerpo, es decir el volcamiento. Pero aun cuando no se pueda prever el fenómeno descrito anteriormente que es fundamental, el comportamiento de cuerpos rígidos en rotación sigue ciertos patrones, que mediante el uso de señales armónicas es posible presentar en forma clara. Los patrones analizados en este capítulo se describen a continuación.

Como se mencionó en el Capítulo 2, la relación de esbeltez del cuerpo se define como la razón  $h/b$ , donde  $h$  es la altura desde la base hasta el centro de masa y  $b$  es la distancia horizontal entre la proyección de la línea de acción del peso y los vértices de rotación del cuerpo. Para cuerpos simétricos esta razón es equivalente a  $H/B$  donde  $H$  y  $B$  son las dimensiones totales del cuerpo. En el transcurso de este capítulo se consideran cuerpos de esbeltez 2, 3 y 4. La evaluación del efecto de esbeltez implica determinar que ocurre con los ángulos de rotación de los cuerpos a medida que estos son más esbeltos y determinar las magnitudes de las aceleraciones que vuelcan los cuerpos para diferentes valores de esbeltez. Sería lógico pensar que los cuerpos de igual esbeltez pero de dimensiones diferentes inician su rotación para niveles similares de aceleración, y lo mismo ocurriría con la aceleración que genera el volcamiento. Sin embargo, Housner observó que

cuerpos que comparten esbelteces, no se vuelcan para las mismas aceleraciones, sino que los cuerpos de mayor tamaño son más estables que los cuerpos más pequeños pero de igual esbeltez. A esta propiedad la denominó factor de escala. En estudios anteriores se ha considerado la máxima aceleración generada por una excitación como variable fundamental en la evaluación del volcamiento de cuerpos rígidos. Sin embargo, se le ha prestado poca atención a los periodos de dichas excitaciones, en este capítulo se evaluará la relación que tienen los periodos de duración más larga frente a periodos de duraciones menores en el volcamiento de cuerpos rígidos.

En la Figura 3.1 se muestra el comportamiento típico de cuerpos rígidos obtenido durante la excitación con señales armónicas, donde los cuerpos pueden volcar después de impactar en la base que los soporta, volcar sin impactos en la base o bien completar su movimiento de rotación sin volcamientos.

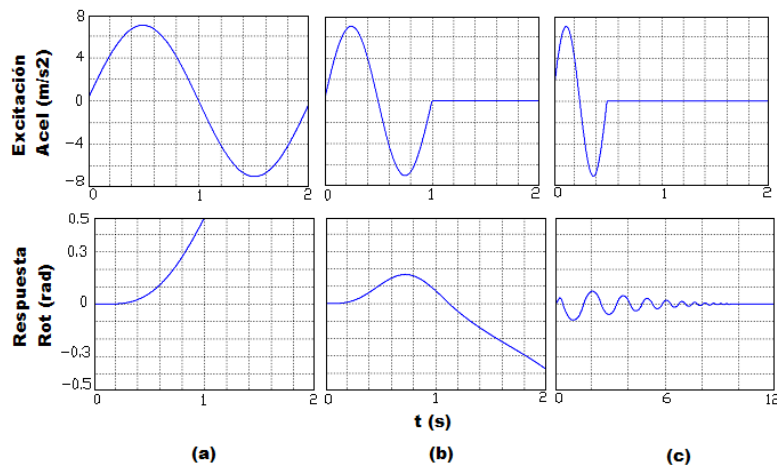


Figura 3.1. Respuesta de cuerpo rígido de 4 m de altura por 1 m de ancho excitado por aceleración sinusoidal. a) Curva de volcamiento sin impactos en la base, b) Curva de volcamiento después de un impacto en la base, c) No se produce volcamiento.

### 3.2. Evaluación del Efecto de Esbeltez en Cuerpos Rígidos Simétricos

Para que se pueda visualizar el rol que juega la esbeltez en el movimiento de rotación de cuerpos rígidos, se muestra en las Figuras 3.2 y 3.3 cuerpos rígidos de esbeltez 2 y 4 (2m x 1m, 4m x 1m), respectivamente, sometidos a las mismas excitaciones (aceleraciones sinusoidales y pulso Ricker). Queda claro que en el cuerpo de esbeltez mayor se generan mayores rotaciones cuando es excitado por el pulso Ricker y cuando es excitado por la onda sinusoidal este incluso alcanza el volcamiento. Por otro lado, el cuerpo de esbeltez 2 adquiere menores rotaciones y no se vuelca. Para extender la evaluación del efecto de esbeltez se sometió a cuerpos con esbelteces 2, 3 y 4 a aceleraciones sinusoidales. Se mantuvo fijo el periodo y se varió la amplitud de las aceleraciones, lo que resulta en mayores peaks de aceleraciones, encontrando que el cuerpo de esbeltez 4, alcanzó el volcamiento para menores aceleraciones, seguido por el cuerpo de esbeltez 3, por otro lado el cuerpo de esbeltez 2 resultó ser más estable, necesitando de amplitudes mucho mayores en relación al resto de los cuerpos para que volcará. Este fenómeno se presenta en la Figura 3.4 donde se muestra con una línea gruesa continua la curva descrita por el cuerpo de esbeltez 2, en línea segmentada, la curva del cuerpo de esbeltez 3, y en línea fina continua la del cuerpo de esbeltez 4. Se puede observar claramente los ángulos de rotación contrastados con la aceleración solicitante.

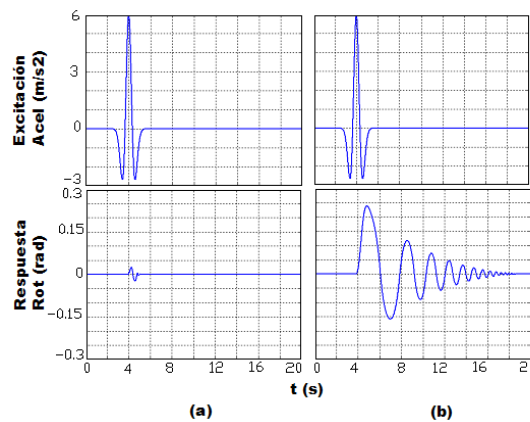


Figura 3.2. Cuerpo rígido excitado por pulso Ricker con periodo 1.5 (s). a) Esbeltez 2, b) Esbeltez 4.

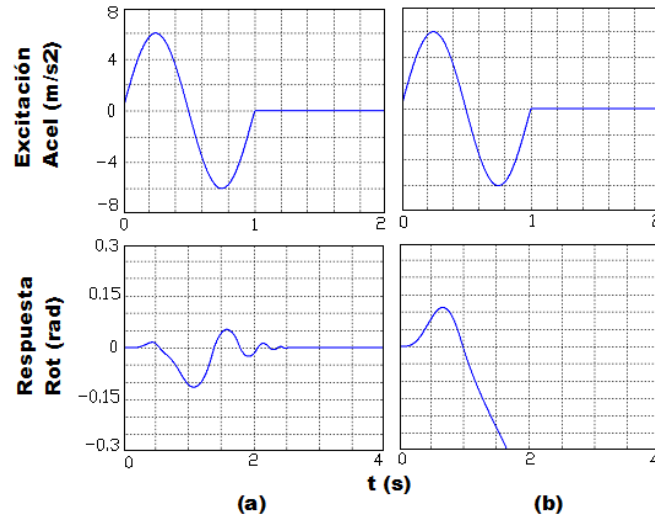


Figura 3.3. Cuerpo rígido excitado por onda sinusoidal con periodo 1 (s). a) No se produce volcamiento, b) Volcamiento después de un impacto.

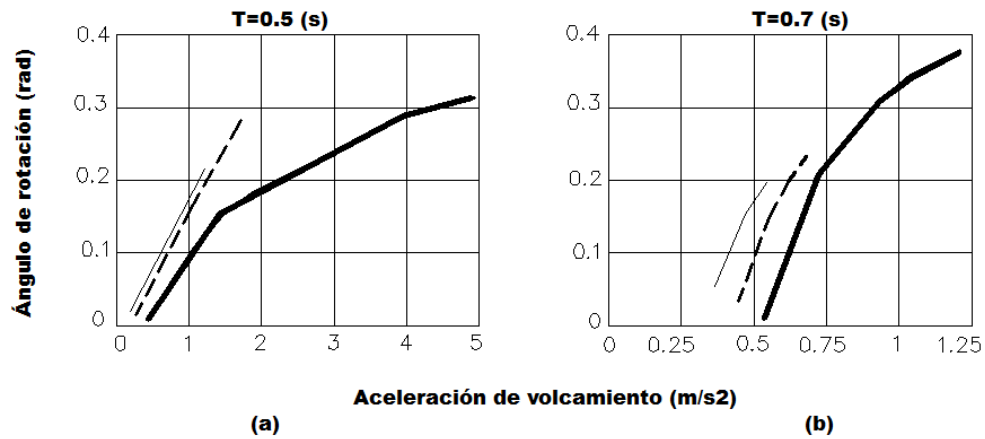


Figura 3.4. Curva de volcamiento para cuerpos con esbelteces 2, 3 y 4 sujeto a aceleraciones sinusoidales. a) Periodo de la onda 0.5 (s), b) Periodo de la onda 0.7 (s).

### 3.3. Evaluación del Factor de Escala en Cuerpos Rígidos Simétricos

Para mostrar claramente el efecto del factor de escala se consideraron los dos cuerpos de esbeltez 2.5 mostrados en la Figura 3.5. Como la magnitud de la aceleración que inicia el movimiento de rotación depende únicamente de la aceleración de gravedad y de la relación entre las dimensiones que posee un cuerpo en cuanto a su base y altura, cuando no son consideradas las aceleraciones verticales del terreno, cuerpos con la misma esbeltez iniciarán el movimiento de rotación en el mismo instante de tiempo como se muestra en la Figura 3.6 y 3.7.

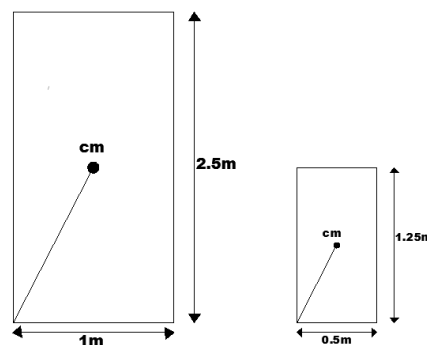


Figura 3.5. Cuerpos de esbeltez 2.5, con distintas dimensiones.

Los cuerpos mostrados en la Figura 3.5 poseen la misma relación de esbeltez ( $H/B$ ) la cual equivale a 2.5, sin embargo se llama factor de escala al valor que relaciona las magnitudes de sus dimensiones, en este caso poseen un factor de escala de 2, ya que las dimensiones del cuerpo de menor tamaño se obtienen dividiendo por 2 las del cuerpo de tamaño más grande, este factor de escala aumentará si se relaciona el cuerpo patrón de dimensiones 2.5 m x 1 m con cuerpos de la misma esbeltez pero de dimensiones menores, como por ejemplo un cuerpo de 25 cm de altura y 10 cm de ancho, cuyo factor de escala entre los cuerpos es de 10. En la Figura 3.6 y la Figura 3.7 se muestra el comportamiento de los cuerpos mostrados en la Figura 3.5 sometidos a las mismas aceleraciones sinusoidales y Ricker respectivamente, se puede notar que el cuerpo de menores dimensiones vuelca para aceleraciones menores que el cuerpo de dimensiones más grandes.

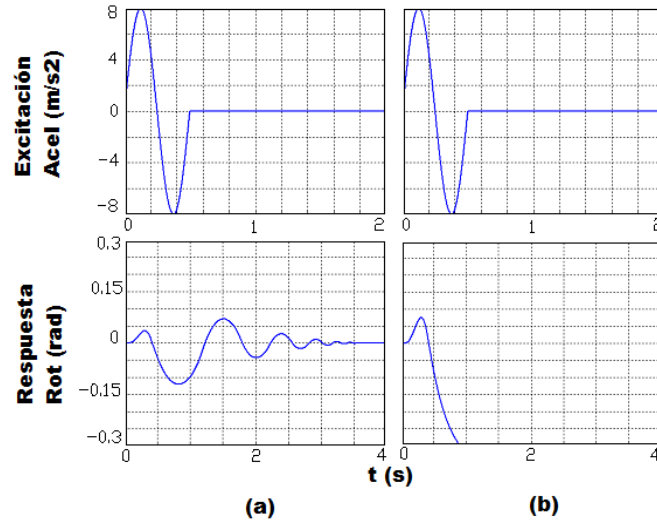


Figura 3.6. Respuesta de cuerpo Rígidos frente a onda sinusoidal de periodo 0.5 (s). a) Cuerpo 2.5m x 1m, no se produce volcamiento, b) Cuerpo 1.25m x 0.5m, volcamiento después de un impacto.

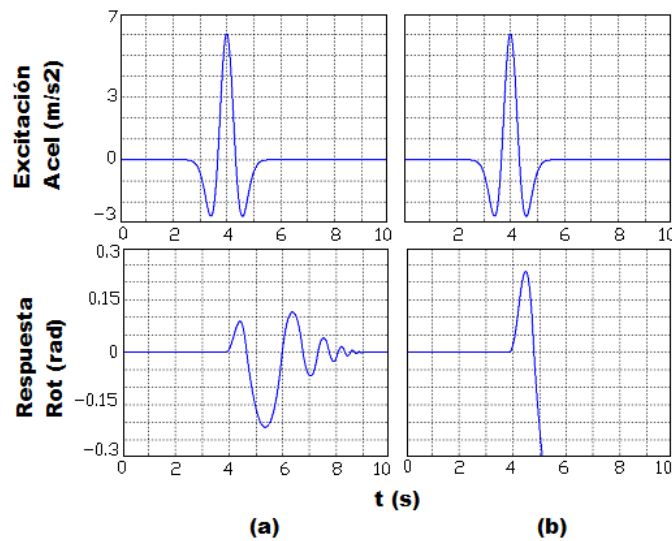


Figura 3.7. Respuesta de cuerpo rígido frente a pulso Ricker con periodo 1.5 (s). a) Cuerpo 2.5m x 1m, no se produce volcamiento, b) Cuerpo 1.25m x 0.5m, volcamiento después de un impacto.

En la Figura 3.6 se muestran 2 cuerpos rígidos de esbeltez 2.5, los cuales están relacionados mediante un factor de escala de 2. Se observó como el cuerpo de la Figura 3.6(a) adquiere un comportamiento más estable permaneciendo sólo en etapa de rotación, por el contrario el cuerpo de la Figura 3.6(b) se vuelca. Esto ocurre debido al factor de escala, ya que Housner definió que los cuerpos de menores dimensiones adquieren peores comportamientos que los cuerpos de la misma esbeltez pero de dimensiones más grandes, ya que la frecuencia y amplitud

de la señal forzante no están escaladas y se relacionan con los parámetros del cuerpo rígido mediante la siguiente ecuación.

$$\frac{a}{g \cdot \alpha} = \sqrt{1 + \frac{I_0}{m \cdot g \cdot R} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{T_g}\right)^2}$$

La ecuación presentada fue definida por Housner (1963), y relaciona la amplitud y el periodo de un movimiento sinusoidal necesarios para volcar un cuerpo rígido.

donde:

$a$  : amplitud de la aceleración forzante.

$T_g$  : periodo de la aceleración forzante.

$I_0$  : inercia del cuerpo con respecto al punto de rotación.

$R$  : semidiagonal del cuerpo.

$m$  : masa del cuerpo.

$\alpha$  : ángulo crítico de rotación del cuerpo.

$g$  : aceleración de gravedad.

La ecuación mostrada establece las magnitudes de aceleración y periodo de la onda sinusoidal para volcar el cuerpo rígido, como la masa del cuerpo puede ser simplificada con la inercia rotacional, la ecuación depende solamente de variables geométricas, las cuales implican que un cuerpo que tiene un mayor valor de  $R$  necesitará mayor valor de la resultante de multiplicar el periodo de la excitación por su amplitud, que un cuerpo que tiene un  $R$  de menor tamaño, siempre considerando que son excitados con la misma sollicitación, es por esta razón que cuerpos que comparten las misma esbeltez, pero con dimensiones diferentes como se muestra en la Figura 3.6, aquellos de dimensiones más pequeñas ( $R$  menor), se comportan de peor forma y alcanzan antes el volcamiento que cuerpos de dimensiones más grandes ( $R$  mayor), por ejemplo si se quiere que cuerpos de la misma relación de esbeltez pero con un factor de escala de 2 como los mostrados en la Figura 3.6 tengan un comportamiento similar, se debe modificar el intervalo de muestreo de la aceleración forzante (modificación de la frecuencia o periodo), este debe ser amplificado o reducido según corresponda por  $\sqrt{n}$  veces el factor de escala geométrico (en el caso de ejemplo 2) antes de aplicar la nueva aceleración al cuerpo de dimensiones más grandes o más pequeño.

La respuesta del cuerpo en el tiempo y el efecto del factor de escala se mostró para un solo cuerpo, en las figuras precedentes, sin embargo esta propiedad puede extenderse para todos los cuerpos de dimensiones diferentes pero iguales esbelteces como se muestra en la Figura 3.8 y 3.9, donde se consideraron esbelteces entre 2 y 4, además ondas sinusoidales con diferentes periodos.

Para comprender mejor las Figuras 3.8 y 3.9, que se muestran más adelante, cabe resaltar que como se mencionó en el Capítulo 2, el parámetro de frecuencia es una variable que es propia de cada cuerpo. Aun cuando estos compartan las mismas esbelteces, sus parámetros de frecuencias son diferentes, por el hecho de ser sus dimensiones diferentes, y a medida que el cuerpo posee dimensiones mayores su parámetro de frecuencia es menor y viceversa como se muestra en la Tabla 3.1

Tabla 3.1. Diferentes configuraciones de cuerpos simétricos en altura total por base total y su correspondiente parámetro de frecuencia.

H/B=4	$\rho$ (rad/s)	H/B=3	$\rho$ (rad/s)	H/B=2	$\rho$ (rad/s)
0.4 x 0.1	5.97	0.6 x 0.2	4.82	0.5 x 0.25	5.13
1.2 x 0.3	3.44	0.9 x 0.3	3.93	1.0 x 0.5	4.05
1.6 x 0.4	2.98	1.2 x 0.4	3.41	2.0 x 1.0	2.56
2.0 x 0.5	2.67	2.4 x 0.8	2.41	3.0 x 1.5	2.09
3.2 x 0.8	2.11	3.0 x 1.0	2.15	4.0 x 2.0	1.81
6.0 x 1.5	1.54	6.0 x 2.0	1.52	6.0 x 3.0	1.48
8.0 x 2.0	1.35	9.0 x 3.0	1,24	8.0 x 4.0	1.28

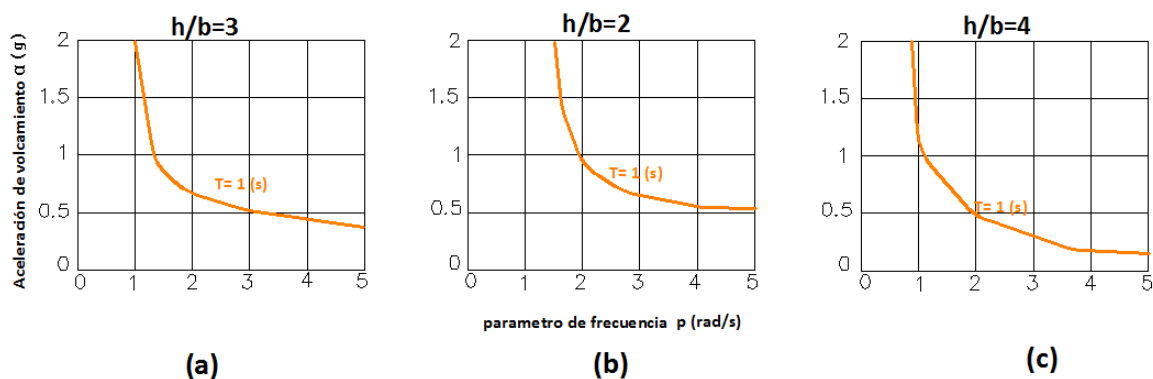


Figura 3.8. Magnitud de las aceleraciones de volcamiento, para cuerpos excitados por aceleración sinusoidal de periodo 1 (s). a) Cuerpo de esbeltez 3, b) Cuerpo de esbeltez 2, c) Cuerpo de esbeltez 4.

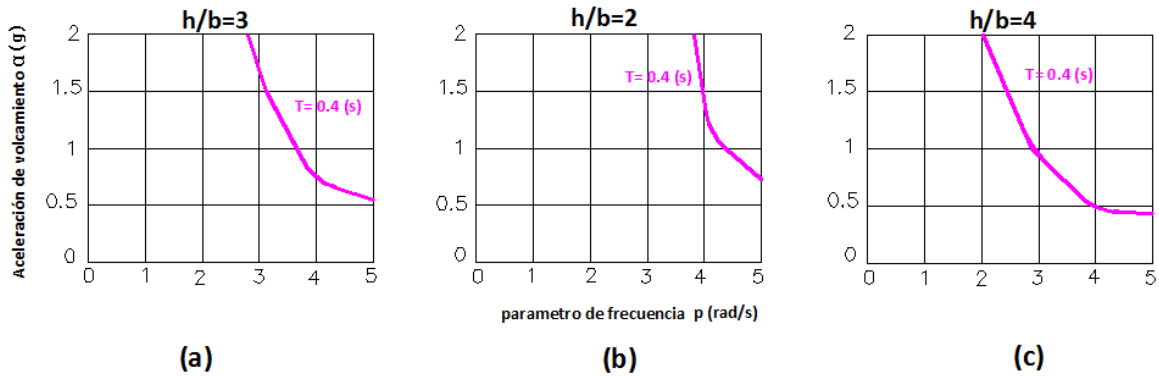


Figura 3.9. Magnitud de las aceleraciones de volcamiento para cuerpos excitados por aceleración sinusoidal de periodo 0.4 (s). a) Cuerpo de esbeltez 3, b) Cuerpo de esbeltez 2), c) Cuerpo de esbeltez 4.

En las Figuras 3.8 y 3.9 cada curva representa cuerpos de la misma esbeltez pero con cambios muy significativo en sus dimensiones, ya que por ejemplo un cuerpo con parámetro de frecuencia de menos de 1 (rad/s) es un cuerpo con dimensiones de altura alrededor de los 10 m y dimensiones de base alrededor de los 2 m. Es muy claro que cuerpo de estas dimensiones no se dejan simplemente apoyados ya que representaría un peligro. Por el contrario construirle algún sistema de fundación es lo más usual. Sin embargo, cuerpos de estas dimensiones se utilizaron para construir las curvas de volcamiento, y así mostrar que para cuerpos de la misma esbeltez, aquellos con dimensiones más grandes son más estables que aquellos con dimensiones menores. Las curvas de las Figuras 3.8 y 3.9 se muestran reducidas estableciendo un límite de aceleración de 2g, ya que se encontró durante los análisis, que cuerpos de parámetro de frecuencias cercanos a 1 (rad/s) alcanzan su volcamiento para magnitudes de aceleración cercanos a 2g para los periodos de las excitaciones analizados.

### 3.4. Evaluación del Periodo de la Excitación en Cuerpos Rígidos Simétricos

Al igual como se planteó un ejemplo con un cuerpo rígido específico para comprender mejor el fenómeno de factor de escala antes de ampliar sus resultados, se muestra en la Figura 3.10 un cuerpo de 3m de altura y 1m de ancho el cual fue excitado por aceleraciones sinusoidales y Ricker, ambas con amplitudes fijas de 5 m/s<sup>2</sup>, pero alargando cada vez más el periodo de las excitaciones se encontró la respuesta mostrada en las Figuras 3.11, a la 3.14.

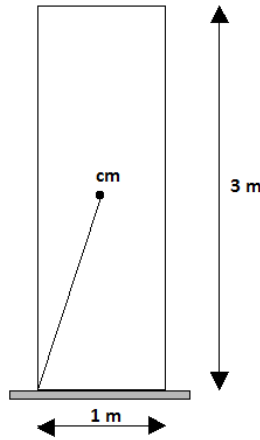


Figura 3.10. Cuerpo rígido simétrico de esbeltez 3.

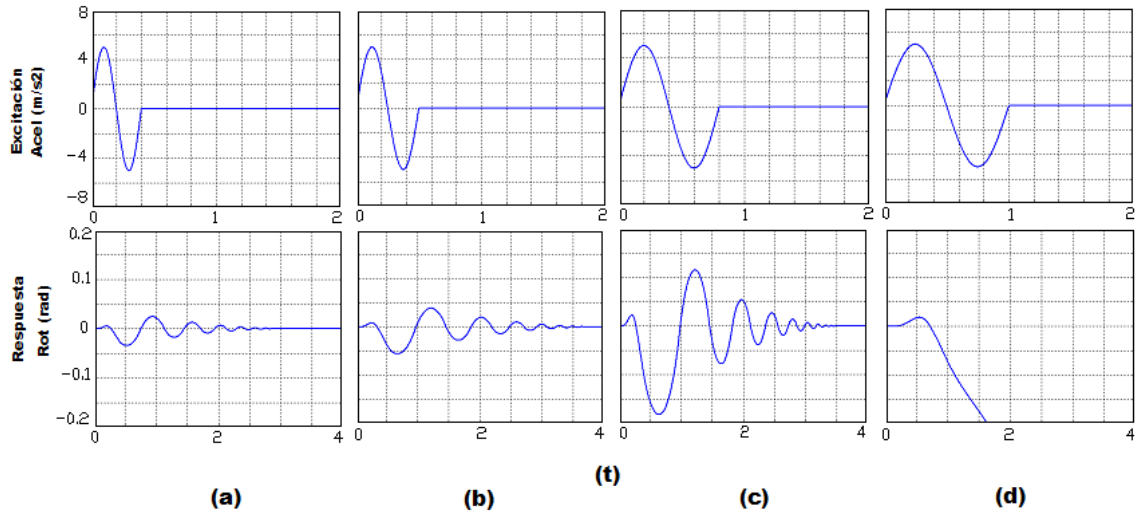


Figura 3.11. Cuerpo de dimensiones 3m x 1m excitado por aceleración sinusoidal de amplitud constante. a) Periodo 0.4 (s), b) Periodo 0.5 (s), c) Periodo 0.8 (s), d) Periodo 1(s).

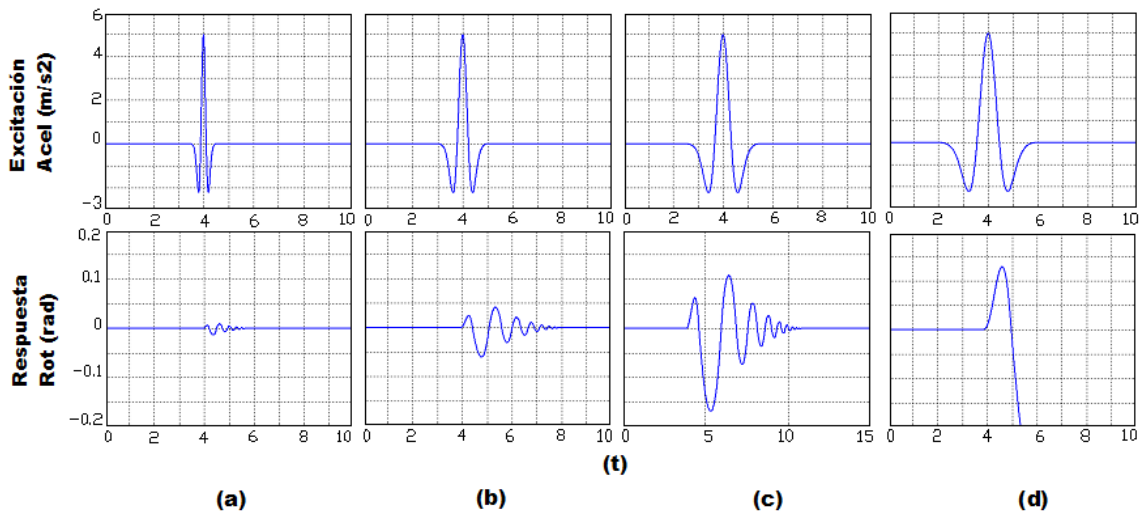


Figura 3.12. Cuerpo de dimensiones 3m x 1m excitados por aceleraciones tipo pulso Ricker de amplitud constante. a) Periodo 0.5 (s), b) Periodo 1(s), c) Periodo 1.5 (s), d) Periodo 2 (s).

En las figuras precedentes se muestra como el cuerpo responde de peor manera frente a ondas de periodo largo que frente a ondas de periodos cortos, ya que a medida que se alargó el periodo tanto para excitaciones sinusoidales (Figura 3.11), como Ricker (Figura 3.13) se acrecentaron las rotaciones del cuerpo, alcanzando el volcamiento para periodos de 1 (s) en las ondas sinusoidales (Figura 3.12) y periodo de 2 (s) para ondas Ricker (Figura 3.14). Este resultado se puede extender comparando las aceleraciones de volcamiento de cuerpos con diferentes esbelteces, como las mostradas en la Figura 3.15.

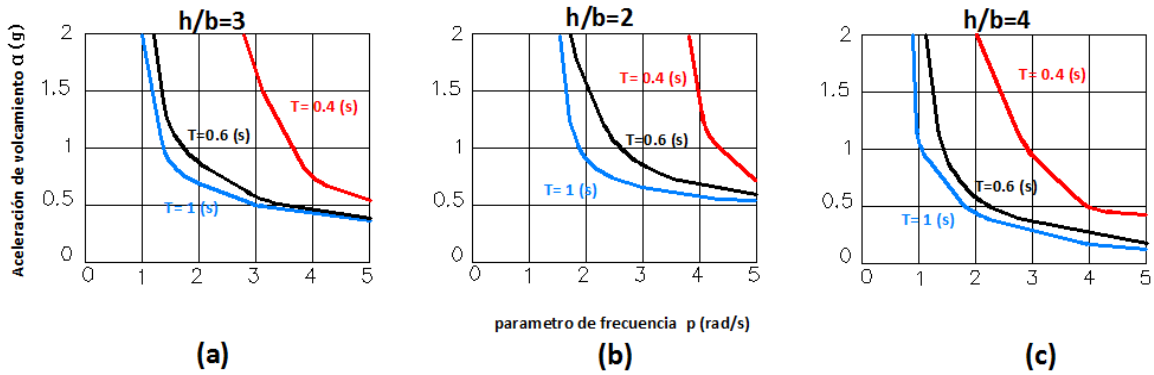


Figura 3.13. Aceleración de volcamiento para cuerpo sometidos a aceleraciones sinusoidales de periodo 0.4 (s), 0.6 (s) y 1 (s). a) Esbeltez 3, b) esbeltez 2, c) esbeltez 4.

En la Figura 3.15 se puede observar como un cuerpo con parámetro de frecuencia especificado responde de peor forma frente a excitaciones de periodo largo. Por ejemplo, para un cuerpo de esbeltez 2 y parámetro de frecuencia de 4 (rad/s) (Figura 3.15(b)), sujeto a una onda de periodo 1 (s) el cuerpo vuelca para una aceleración de 0.6g, y para una onda de periodo de 0.4 (s) el cuerpo vuelca para una aceleración de 1.35g. Se debe aclarar que la aceleración de volcamiento mostrada en las gráficas de la Figura 3.15 ha sido limitada a 2g, ya que cuerpos con parámetros de frecuencias cercanos a la unidad y bajo los periodos de las excitaciones consideradas vuelcan para magnitudes de aceleración superior a 2g.

### 3.5. Resumen de Resultados

En las Figuras 3.16, 3.17, y 3.18 se muestran gráficas construidas en base a aceleraciones armónicas, donde se puede observar en forma resumida todos los resultados mostrados en este capítulo. La Figura 3.16 representa cuerpos de esbeltez 2, la Figura 3.17 cuerpos de esbeltez 3 y la Figura 3.18 cuerpos de esbeltez 4. En las gráficas se muestra con una línea verde la zona de reposo, es decir donde para cualquier frecuencia de la aceleración el cuerpo no inicia la fase de rotación, este valor varía dependiendo únicamente de la esbeltez de los cuerpos siendo el más alto para el cuerpo de esbeltez 2 equivalente a 0.5g, cada línea roja representa el límite entre la zona de volcamiento (por sobre la línea) y la zona de rotación (bajo la línea) para cuerpos que poseen igual esbeltez pero diferentes dimensiones.

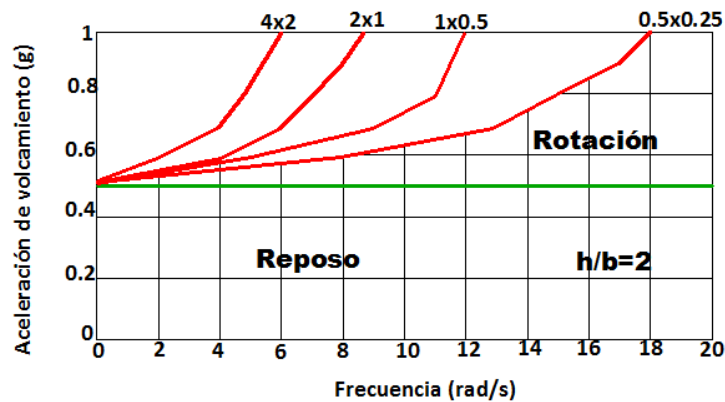


Figura 3.14. Resumen de curvas de volcamiento para cuerpos con esbeltez 2.

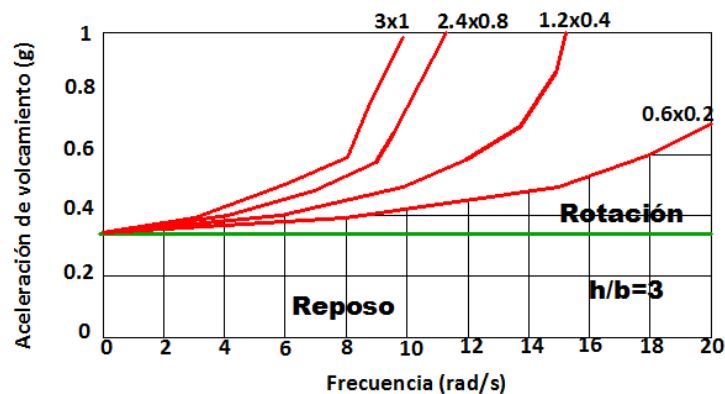


Figura 3.15. Resumen de curvas de volcamiento para cuerpos con esbeltez 3.

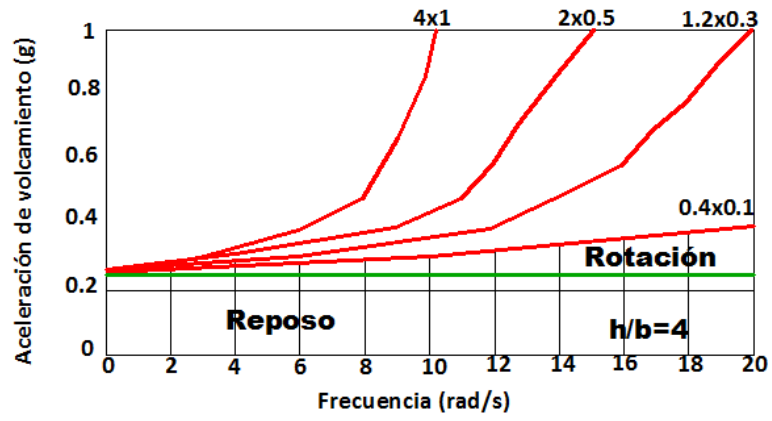


Figura 3.16. Resumen de curvas de volcamiento para cuerpos con esbeltez 4.

### 3.6. Cuerpos Rígidos Asimétricos

Un cuerpo rígido se considera asimétrico o con excentricidad del centro de masa, cuando este no se encuentra a distancias iguales de las esquinas de giro como se muestra en la Figura 3.5. En el Capítulo 2 se presentó la forma de cómo se puede obtener la respuesta de cuerpos en esta condición. En el presente capítulo se analizará que ocurre con la respuesta de cuerpos rígidos asimétricos a medida que varía su porcentaje de asimetría, definido como el porcentaje del valor de la distancia entre su centro de masa y las esquinas de rotación cuando el cuerpo es simétrico, por ejemplo un cuerpo de dimensiones 2m de alto x 1m de ancho simétrico posee distancias de ancho de base de 0.5 m hacia cada lado (derecho e izquierdo), si este cuerpo posee un 50 % de asimetría derecha la distancia desde su centro de masa hacia el lado derecho ya no será 0.5 m si no que será 0.25 m y la distancia desde su centro de masa hacia el lado izquierdo será 0.75m. Este análisis se realizó para cuerpos de esbeltez 2 y 3 considerando diferentes porcentajes de asimetría derecha e izquierda respectivamente. Esto se realiza con la intención de verificar si la excentricidad del centro de masa es una variable beneficiosa o perjudicial desde el punto de vista del volcamiento de cuerpos rígidos.

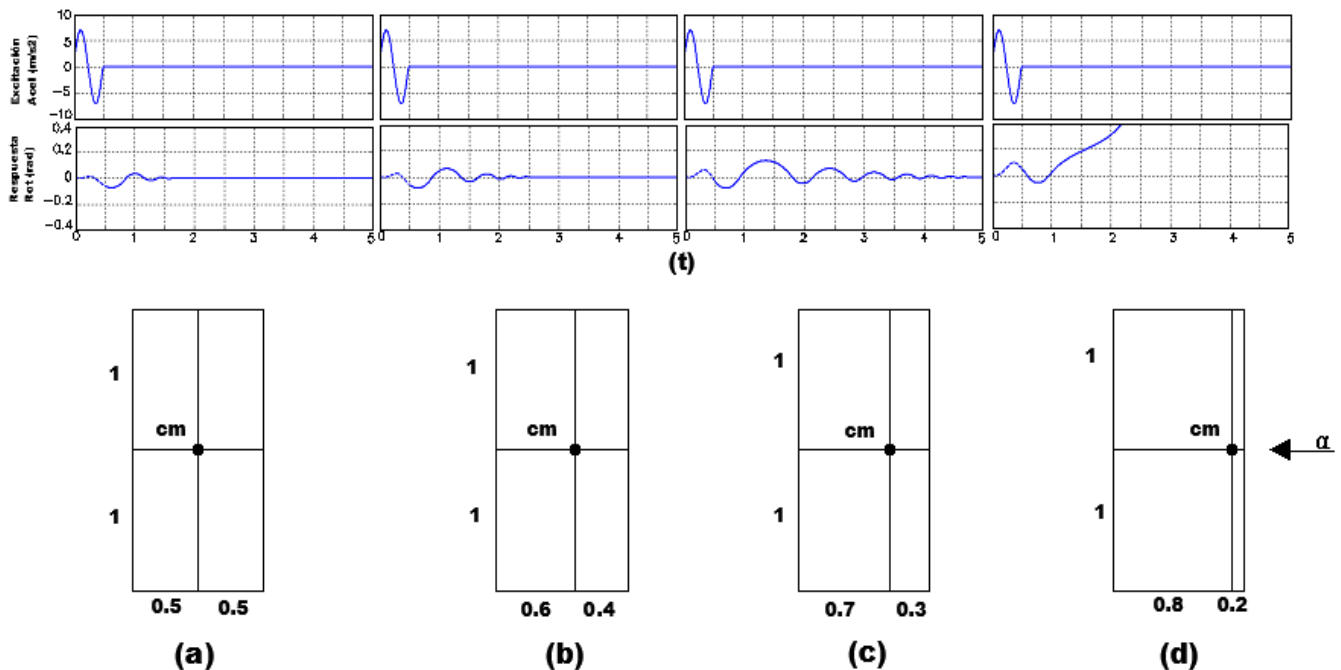


Figura 3.17. Respuesta de cuerpos rígidos con excentricidad derecha.

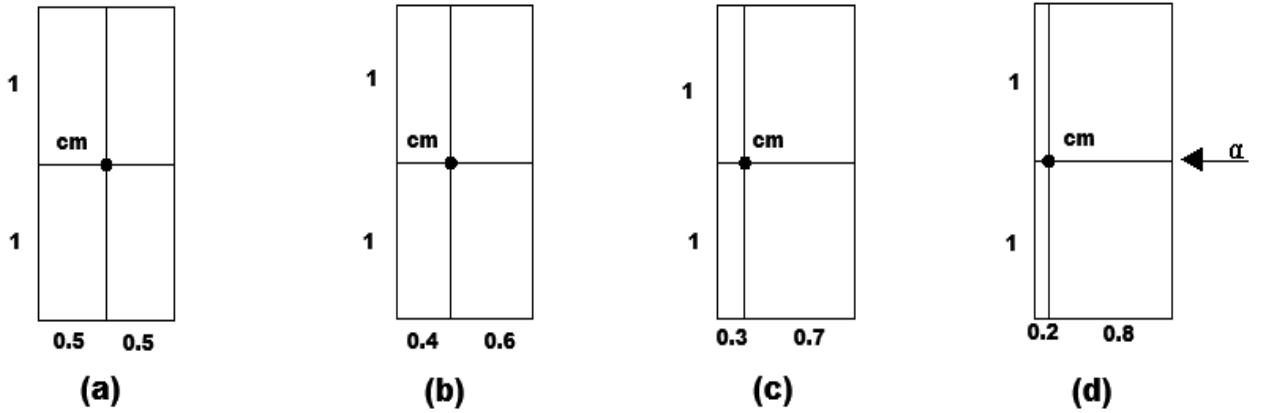
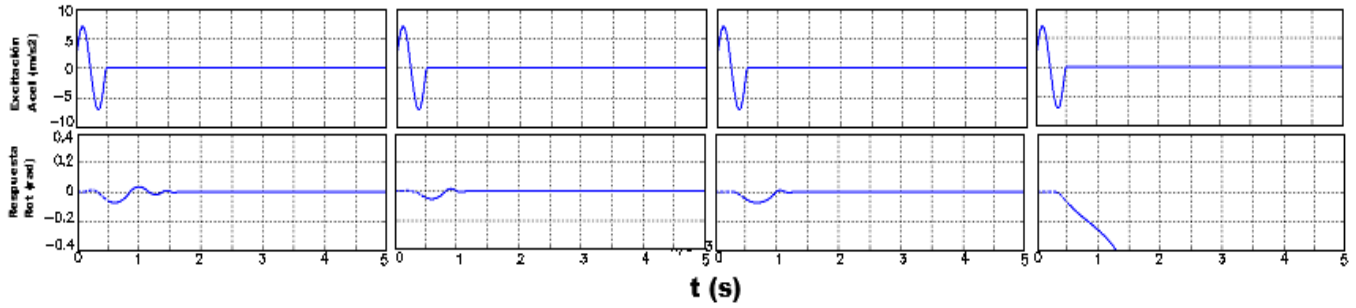


Figura 3.18. Respuesta de cuerpos rígidos con excentricidad izquierda

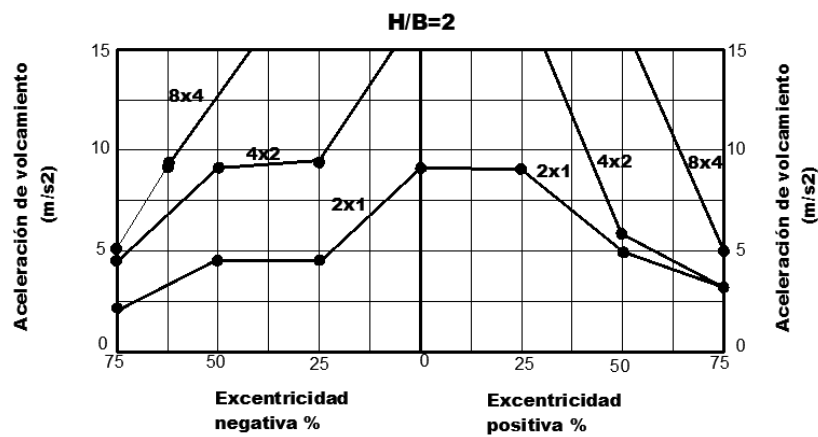


Figura 3.19. Respuesta de cuerpos rígidos de esbeltez 2 con excentricidad derecha (positiva) e izquierda (negativa).

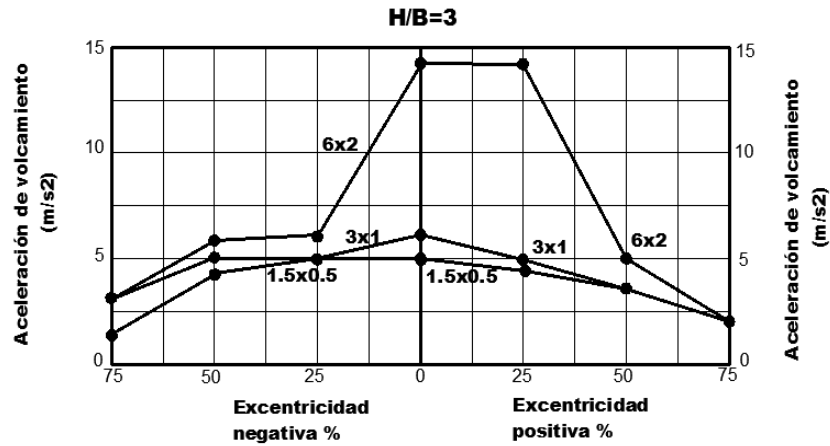


Figura 3.20. Respuesta de cuerpos rígidos de esbeltez 3 con excentricidad derecha (positiva) e izquierda (negativa).

En las Figuras 3.19 y 3.20 se muestran como los cuerpos alcanzan el volcamiento para menores magnitudes de aceleración, a medida que aumenta el porcentaje de excentricidad del centro de masa. Se debe considerar que si bien el cuerpo es sensible a la dirección de ataque de la aceleración externa, debido a las diferentes magnitudes del momento restituyente generado por el peso del cuerpo, cuando la aceleración posee la magnitud necesaria para sacar del reposo al cuerpo, las magnitudes de aceleración que vuelcan los cuerpos no muestran grandes diferencias al volcar cuerpos con excentricidad derecha e izquierda. Por ejemplo se comenta que en la Figura 3.20 para el cuerpos de dimensiones 3m x 1m y 50 % de excentricidad del centro de masa, cuando la excentricidad es derecha el cuerpo se vuelca para una aceleración de 3.5 m/s<sup>2</sup>, y cuando la excentricidad es izquierda el cuerpo vuelca para una magnitud de aceleración de 4 m/s<sup>2</sup>.

## 4. Respuesta Dinámica de Cuerpos Rígidos Frente a Aceleraciones Registradas

### 4.1. General

En el presente capítulo se analiza la respuesta de cuerpos rígidos frente a aceleraciones sísmicas registradas. Los resultados de la modelación fueron obtenidos numéricamente usando las ecuaciones que caracterizan el movimiento, desarrolladas en el Capítulo 2, para cuerpos con densidad de  $2000 \frac{kg}{m^3}$  y espesores igual al ancho de la base, integradas mediante el desarrollo de un código en MATLAB, utilizando el algoritmo de Runge-Kutta de 4to orden. Para visualizar el comportamiento de los cuerpos rígidos en rotación se analiza un set de cuerpos rígidos cuyas dimensiones se muestran en la Tabla 4.1, además se han incrementado las magnitudes de las aceleraciones en un 50 % y 100 %, para cada uno de los registros utilizados, de manera que cada uno de ellos sea capaz de inducir la rotación como mínimo en los cuerpos de esbeltez 3 y para visualizar el comportamiento que adquieren los cuerpos cuando son excitados por magnitudes mayores de aceleración.

Tabla 4.1. Dimensiones en metros de los cuerpos rígidos analizados durante el capítulo.

h/b =2	h/b =3	h/b =4	h/b =5	h/b =6	h/b =7
4 x 2	3 x 1	4 x 1	5 x 1	6 x 1	7 x 1
2 x 1	1.5 x 0.5	2 x 0.5	2.5 x 0.5	3 x 0.5	3.5 x 0.5
1 x 0.5	0.9 x 0.3	1 x 0.25	1 x 0.2	1.5 x 0.25	0.7 x 0.1
0.5 x 0.25	0.6 x 0.2	0.4 x 0.1	0.5 x 0.1	0.6 x 0.1	
0.2 x 0.1	0.3 x 0.1				

Aun cuando se ensayaron todas las esbelteces mostradas en la Tabla 4.1 en los resultados mostrados en el transcurso del capítulo se omiten los obtenidos para esbeltez 3, 5 y 7 debido al comportamiento relativamente similar a los de esbeltez 4 y 6, con la intención de mostrar resultados en tablas más compactas, además se introduce la sigla SR (sin registro), donde no se obtuvieron registros para la relación entre las sollicitaciones y esbelteces según corresponda. Para visualizar las tablas completas ver anexo B.

En este análisis se consideraron tres tipos de respuestas:

- a) Reposo: Los cuerpos que se mantienen en reposo durante el transcurso de las simulaciones de los distintos sismos registrados en el análisis, son aquellos casos en que el momento restituyente no fue sobrepasado por el momento externo generado por la aceleración del terreno. Es decir, la magnitud de las aceleraciones no fue lo suficientemente grande, para iniciar el movimiento de rotación.
- b) Rotación: Los cuerpos que ingresan en el movimiento de rotación son aquellos cuyo momento restituyente es sobrepasado por el momento externo que se genera debido a las aceleraciones, sin embargo la magnitud de los ángulos de rotación que adquieren los cuerpos son menores que el ángulo de rotación crítico.
- c) Volcamiento: Los cuerpos que se vuelcan son aquellos que durante el movimiento de rotación sobrepasan el ángulo de rotación crítico respectivamente. Es decir, su peso genera un momento volcante.

Los registros de aceleraciones analizados durante el transcurso de este capítulo se muestran en la Tabla 4.2 y 4.3, además, en la Tabla 4.2 se muestran los periodos característicos de los acelerogramas analizados, encontrados mediante una aproximación, utilizando la transformada rápida de Fourier, ver Anexo A.

Tabla 4.2. Registro de aceleraciones sin modificación de aceleraciones

Nombre	Fecha	PGA (g)	T. característico
El Centro Imperial Valley, USA	15/10/1979	0.41	0.65-1.0 (s)
Lucerne Lander, USA	28/06/1992	0.73	0.10-0.15 (s)
Duzce, Turquía	12/11/1999	0.35	0.40-0.7 (s)
Chi-Chi, Taiwán	20/09/1999	0.23	0.50-1.0 (s)
Convict Creek, USA	25/05/1980	0.21	0.30-0.7 (s)
Izmit Kocaeli, Turquía	17/08/1999	0.22	0.15-0.2 (s)

Tabla 4.3. Registros con modificación de aceleraciones mediante un factor de amplificación (FA).

Nombre	Fecha	FA		PGA (g)	
El Centro Imperial Valley, USA	15/10/1979	1.5	2	0.61	0.82
Lucerne Landers, USA	28/06/1992	1.5	2	1.09	1.46
Duzce, Turquía	12/11/1999	1.5	2	0.52	0.70
Chi-Chi, Taiwán	20/09/1999	1.5	2	0.34	0.46
Convict Creek, USA	25/05/1980	1.5	2	0.31	0.42
Izmit Kocaeli, Turquía	17/08/1999	1.5	2	0.33	0.44

## 4.2. Respuesta de Cuerpos Rígidos Frente a Sismos Registrados

### 4.2.1. El Centro Imperial Valley, USA

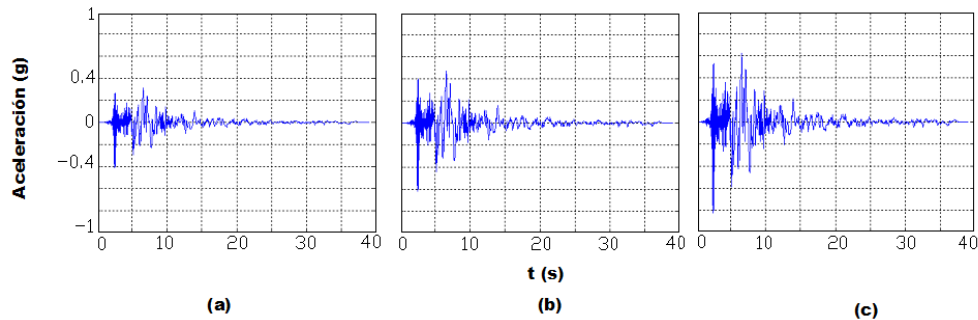


Figura 4.1. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2.

Tabla 4.4. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de El Centro.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA=1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Durante el transcurso de las aceleraciones de El Centro, sólo permanecieron en reposo los cuerpos de esbeltez 2 para un FA de 1, ya que la máxima aceleración generada fue de 0.41g, y la necesaria para iniciar la rotación en cuerpos de esbeltez 2 es de 0.5g. Cuando fue aumentado el FA de las aceleraciones se alcanzaron peaks de 0.61g y 0.82g, para FA de 1.5 y 2 respectivamente, lo cual hizo iniciar el movimiento de rotación.

Tabla 4.5. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de El Centro.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA=1.5	FA =2
SR	4x2	4x2	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	1x0.5	1x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	0.2x0.1	0.2x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Los cuerpos que permanecieron en fase de rotación fueron aquellos que no excedieron su correspondiente ángulo máximo de giro, como muestra la Tabla 4.5, sólo fueron aquellos de esbeltez 2, tanto para FA de 1.5 y 2.

Tabla 4.6. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de El Centro.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	4x1	4x1	4x1	6x1	6x1	6x1
SR	SR	SR	1x0.25	1x0.25	1x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25
SR	SR	SR	0.4x0.1	0.4x0.1	0.4x0.1	0.6x0.1	0.6x0.1	0.6x0.1

Los cuerpos que se volcaron fueron aquellos que excedieron su ángulo crítico de rotación, el cual varía entre 0.14 rad a 0.46 rad para los cuerpos de análisis, en este caso fueron todos aquellos de esbeltez superior a 3.

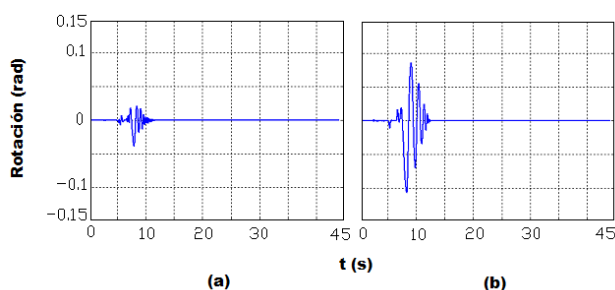


Figura 4.2. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 3 (3m x 1m). a) FA 1.5, b) FA 2.

En la Figura 4.2 se muestra la respuesta del cuerpo de dimensiones 3m x 1m, sometido a las aceleraciones de El Centro, se muestra como los ángulos de rotación alcanzados por el cuerpo son más grandes en la Figura 4.2(b), ya que está sometido a mayores niveles de aceleraciones.

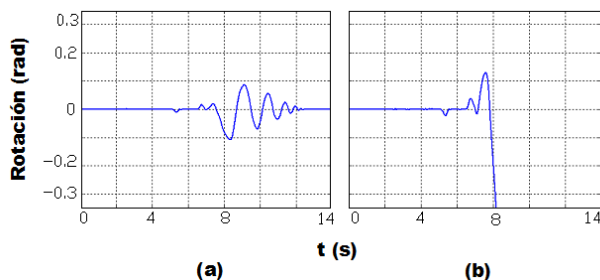


Figura 4.3. Cuerpos de esbeltez 3 sometidos a FA 2. a) 3m x 1m (rotación). b) 1.5m x 0.5m (volcamiento).



Durante el transcurso de las aceleraciones de Lucerne, no permaneció ninguno de los cuerpos ensayados en reposo, ya que el cuerpo de esbeltez 2 es el que necesita mayor magnitud de aceleración para rotar (0.5g), y la máxima aceleración proporcionada por el registro fue de 0.73g, para un FA 1.

Tabla 4.8. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Lucerne.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	4x2	4x2	4x1	4x1	SR	SR	SR	SR
1x0.5	1x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	0.2x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Los cuerpos que permanecieron en fase de rotación fueron aquellos que no excedieron su correspondiente ángulo máximo de giro, como muestra la Tabla 4.8, fueron en su mayoría los de esbeltez 2. Sin embargo, también permanecieron en rotación los cuerpos de esbelteces superiores (3 y 4), pero sólo en sus dimensiones más grandes.

Tabla 4.9. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Lucerne.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	1x0.25	1x0.25	4x1	6x1	6x1	6x1
SR	SR	SR	0.4x0.1	0.4x0.1	1x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25
SR	SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	0.6x0.1	0.6x0.1	0.6x0.1

Los cuerpos que se volcaron fueron aquellos que excedieron su ángulo crítico de rotación, en este caso fueron todos aquellos de esbeltez superior a 4, además los cuerpos de esbeltez 4 también experimentaron el volcamiento, pero sólo aquellos de dimensiones más pequeñas.

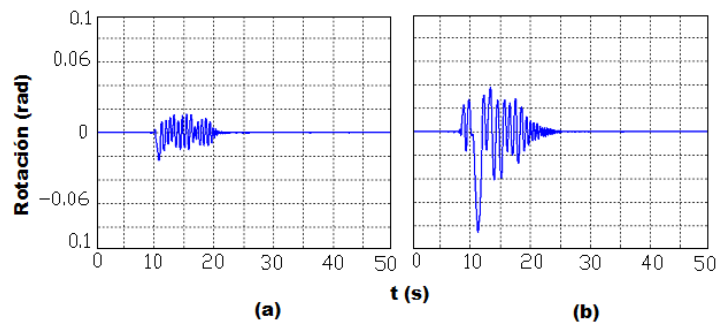


Figura 4.6. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 4 (4m x 1m). a) FA 1, b) FA 1.5.

En la Figura 4.6 se muestra la respuesta del cuerpo de dimensiones 4m x 1m, sometido a las aceleraciones de Lucerne, se muestra como los ángulos de rotación son más pequeños en la Figura 4.6(a), ya que el cuerpo está sometido a menores niveles de aceleración, con respecto a la Figura 4.6(b).

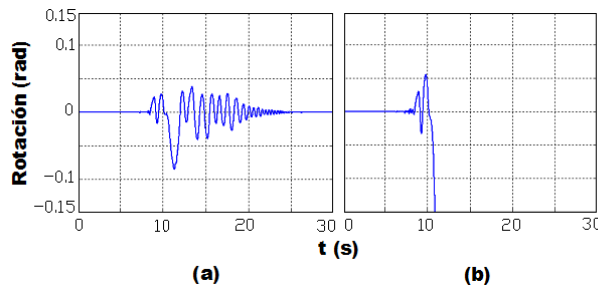


Figura 4.7. Cuerpos de esbeltez 4 sometidos a un FA 1.5. a) 4m x 1m (rotación). b) 2m x 0.5m (volcamiento).

En la Figura 4.7 se muestra la respuesta de cuerpos de esbeltez 4 sometido a las aceleraciones de Lucerne con un FA 1.5, se muestra como el cuerpo de mayores dimensiones (Figura 4.7(a)) permanece sólo en fase de rotación, por otro lado el cuerpo de dimensiones más pequeñas se vuelca.

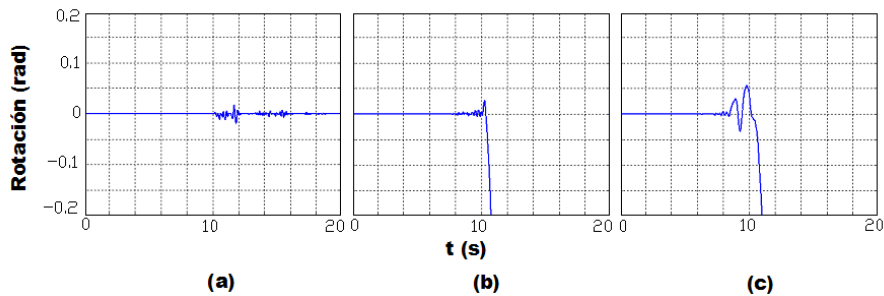


Figura 4.8. Cuerpos sometidos a un FA 1.5. a) 1m x 0.5m (rotación). b) 1.5m x 0.5m (volcamiento). c) 2m x 0.5m (volcamiento).

En la Figura 4.8 se muestra la respuesta de cuerpos de diferentes esbelteces, sometidos a una intensidad de 1.5, en la Figura 4.8(a), se observa como el cuerpo

de esbeltez 2 permanece en fase de rotación. Por otro lado los cuerpos de esbeltez 3 (Figura 4.8(b)) y esbeltez 4 (Figura 4.8(c)) experimentan el volcamiento.

### 4.2.3. Duzce, Turquía

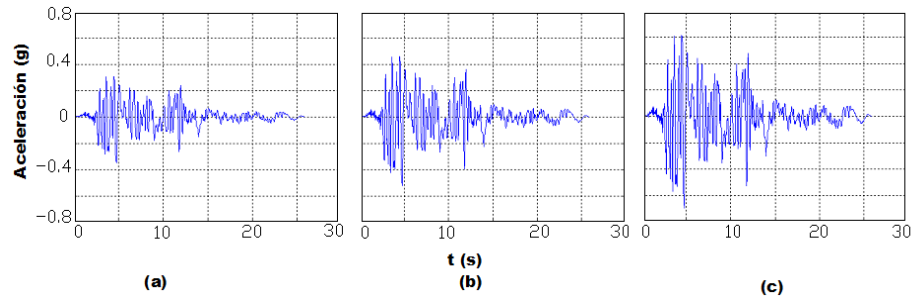


Figura 4.9. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2.

Tabla 4.10. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Duzce.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Durante el transcurso de las aceleraciones de Duzce, sólo permanecieron en reposo los cuerpos de esbeltez 2 para un FA de 1, ya que la máxima aceleración generada fue de 0.35g, y la necesaria para iniciar la rotación en cuerpos de esbeltez 2 es de 0.5g. Cuando fue aumentado el FA de las aceleraciones se alcanzaron peaks de 0.52g y 0.70g, para FA de 1.5 y 2 respectivamente, por lo que ningún cuerpo permaneció en reposo.

Tabla 4.11. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Duzce.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	4x2	4x2	4x1	4x1	SR	6x1	SR	SR
SR	1x0.25	1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	0.2x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Los cuerpos que permanecieron en fase de rotación fueron aquellos que no excedieron su correspondiente ángulo máximo de giro, como muestra la Tabla 4.11,

fueron aquellos de esbeltez 2 en su mayoría, sin embargo, también permanecieron en rotación aquellos cuerpos de mayores esbelteces (4 y 6), pero sólo los de mayores dimensiones.

Tabla 4.12. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Duzce.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	0.2x0.1	1x0.25	1x0.25	4x1	1.5x0.25	6x1	6x1
SR	SR	SR	0.4x0.1	0.4x0.1	1x0.25	0.6x0.1	1.5x0.25	1.5x0.25
SR	SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	0.6x0.1	0.6x0.1

Los cuerpos que se volcaron fueron aquellos que excedieron su ángulo crítico, en esta ocasión fueron todos aquellos de esbelteces más elevadas (6). Sin embargo, también se volcaron los cuerpos de menores esbelteces, pero sólo aquellos de dimensiones más pequeñas.

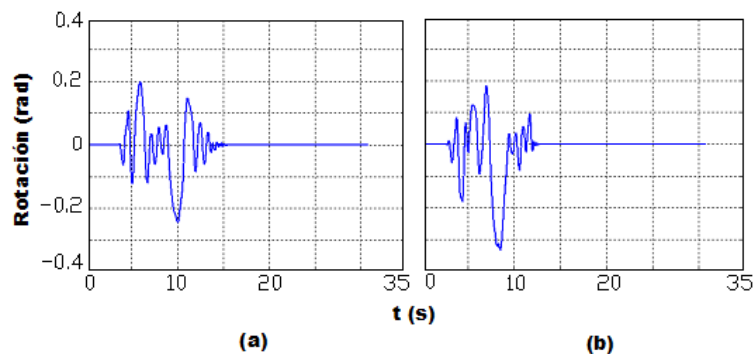


Figura 4.10. Rotación de cuerpo rígido de esbeltez 3 (1.5m x 0.5m). a) FA 1.5, b) FA 2.

En la Figura 4.10 se muestra la respuesta del cuerpo de dimensiones 1.5m x 0.5m, sometido a las aceleraciones de Duzce con FA de 1.5 (Figura 4.10(a)) y 2 (Figura 4.10(b)), se muestra como los ángulos de rotación del cuerpo aumentaron levemente cuando fue excitado por aceleraciones de mayor FA.

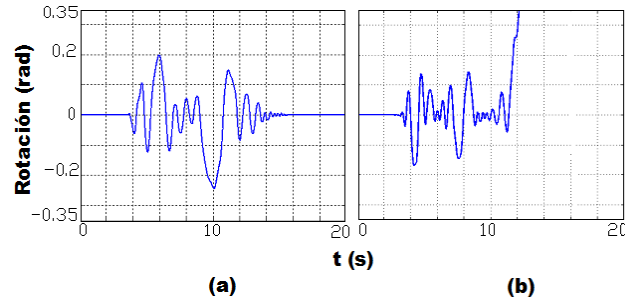


Figura 4.11. Cuerpos de esbeltez 3 sometidos a un FA 1.5. a) 1.5m x 0.5m (rotación). b) 0.9m x 0.3m (volcamiento).

En la Figura 4.11 se muestra la respuesta de cuerpos de esbeltez 3 sometido a las aceleraciones con un FA de 1.5, se observa como en la Figura 4.11(a) el cuerpo de dimensiones 1.5m x 0.5m permanece sólo en fase de rotación, por otro lado el cuerpo de la Figura 4.11(b) de dimensiones 0.9m x 0.3m alcanza el volcamiento.

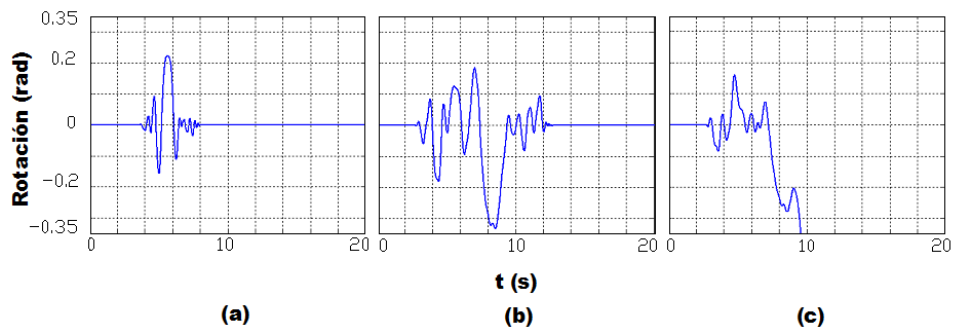


Figura 4.12. Cuerpos sometidos a FA 2. a) 1m x 0.5m (rotación), b) 1.5m x 0.5m (rotación), c) 2m x 0.5m (volcamiento).

En la Figura 4.12 se muestra la respuesta de cuerpos de diferentes esbelteces sometidos a aceleraciones con FA 2. Se puede observar como los cuerpos de esbeltez 2 y 3 (Figura 4.12(a) y 4.12(b)) respectivamente permanecen en fase de rotación, por otro lado el cuerpo de esbeltez 4 (Figura 4.12(c)) se volcó.

#### 4.2.4. Chi-Chi, Taiwán

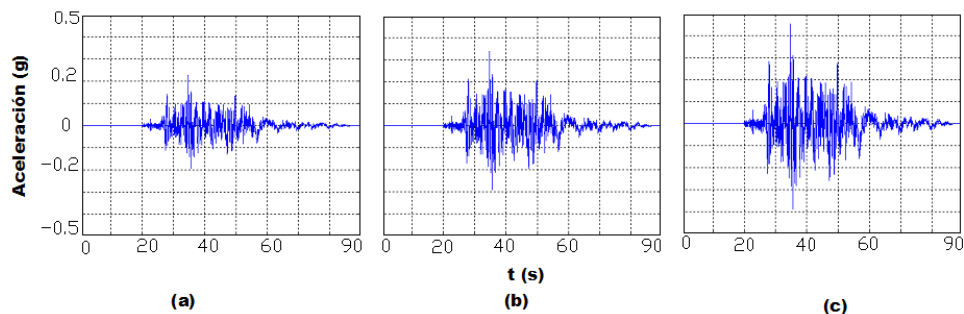


Figura 4.13. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2.

Tabla 4.13. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Chi-Chi.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	4x2	4x2	4x1	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	1x0.5	1x0.5	1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	0.2x0.1	0.2x0.1	0.4x0.1	SR	SR	SR	SR	SR

Durante el transcurso de las aceleraciones de Chi-Chi, sólo permanecieron en reposo los cuerpos de esbeltez 2 y 4 para un FA de 1, 1.5 y 2 respectivamente, ya que la máxima aceleración generada no fue la necesaria para iniciar el movimiento de rotación en cuerpos de esbeltez 2, además la aceleración que inicia la rotación en cuerpos de esbeltez 4 es 0.25g, la cual no fue superada por el registro de FA de 1, el cual generó un peak de 0.23g.

Tabla 4.14. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Chi-Chi.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	4x1	SR	6x1	6x1	SR
SR	SR	SR	SR	1x0.25	SR	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	SR	SR	SR

Los cuerpos que permanecieron en fase de rotación fueron aquellos que no excedieron su correspondiente ángulo máximo de giro, como muestra la Tabla 4.5, sólo fueron aquellos de esbeltez 4 y los cuerpos de mayores dimensiones de esbeltez 6, para un FA de 1.5.

Tabla 4.15. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Chi-Chi.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	SR	4x1	1.5x0.25	1.5x0.25	6x1
SR	SR	SR	SR	SR	1x0.25	0.6x0.1	0.6x0.1	1.5x0.25
SR	SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	SR	0.6x0.1

Los cuerpos que se volcaron fueron aquellos que excedieron su ángulo crítico de rotación, los cuales fueron todos los cuerpos de esbeltez 4 y 6 para un FA de 2, también se volcaron los cuerpos de menores dimensiones de esbeltez 6, para un FA de 1.5.

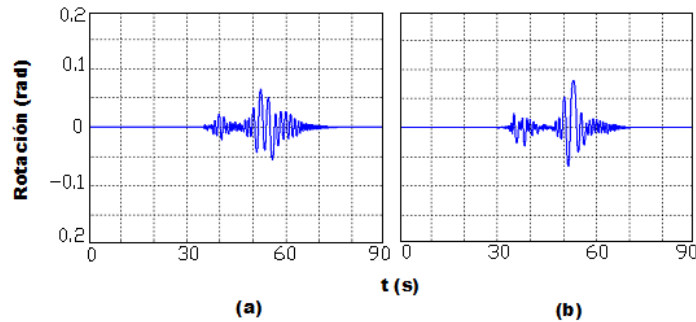


Figura 4.14. Rotación de cuerpo rígido de esbeltez 6 (6m x 1m). a) FA 1, b) FA 1.5.

En la Figura 4.2 se muestra la respuesta del cuerpo de esbeltez 6 sometido a diferentes FA, se observa en la Figura 4.2(b) que el cuerpo al ser sometido a un mayor FA adquiere mayores ángulos de rotación.

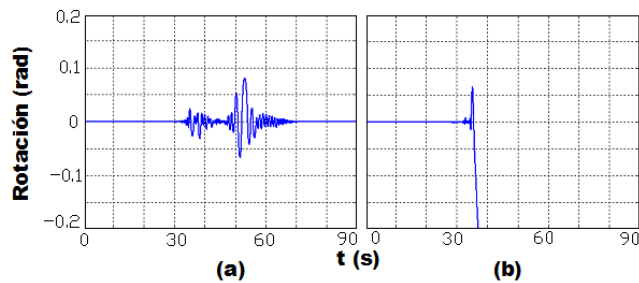


Figura 4.15. Cuerpos de esbeltez 6 sometidos a FA 1.5. a) 6m x 1m (rotación). b) 3m x 0.5m (volcamiento).

En la Figura 4.15 se muestra la respuesta de cuerpos de esbeltez 6 sometidos a un FA de 1.5, se muestra en la Figura 4.15(a), como el cuerpo de mayores dimensiones resulto tener un comportamiento más estable que el cuerpo de la Figura 4.12(b) el cual posee menores dimensiones.

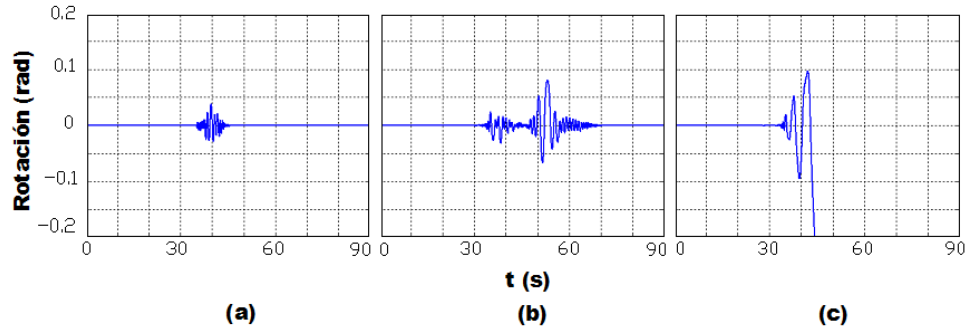


Figura 4.16. Cuerpos sometidos a FA 1.5. a) 4m x 1m (rotación), b) 6m x 1m (rotación), c) 7m x 1m (volcamiento).

En la Figura 4.16 se muestran cuerpos de diferentes esbelteces sometidos a un FA de 1.5, se observa en la Figura 4.16(a) como el cuerpo de esbeltez 4 adquiere un comportamiento más estable alcanzando menores ángulos de rotación que el cuerpo de la Figura 4.16(b) que es de esbeltez 6. Por otro lado el cuerpo de la Figura 4.16(c) adquirió el peor comportamiento alcanzando el volcamiento

#### 4.2.5. Convict Creek, USA

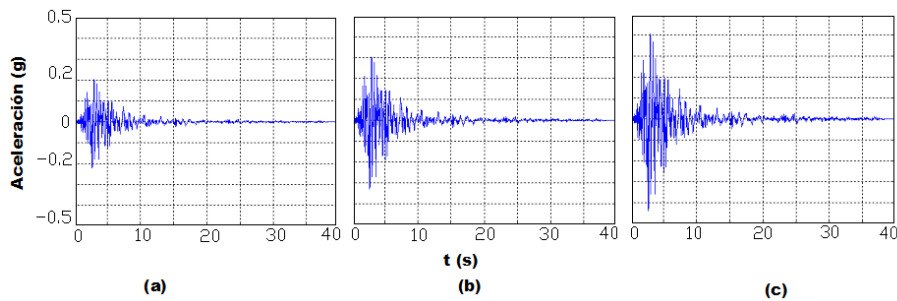


Figura 4.17. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2.

Tabla 4.16. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Convict.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	4x2	4x2	4x1	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	1x0.5	1x0.5	1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	0.2x0.1	0.2x0.1	0.4x0.1	SR	SR	SR	SR	SR

Durante el transcurso de las aceleraciones de Convict, permanecieron en reposo los cuerpos de esbeltez 2 para FA 1, 1.5 y 2, además también experimentaron

reposito los cuerpos de esbeltez 4, pero sólo para FA de 1, ya que la máxima aceleración que se generó fue de 0.21g y los cuerpos de esbeltez 4 inician la etapa de rotación a 0.25g.

Tabla 4.17. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Convict.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	4x1	4x1	6x1	6x1	6x1
SR	SR	SR	SR	1x0.25	1x0.25	1.5x0.25	SR	SR
SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	0.6x0.1	SR	SR

Los cuerpos que permanecieron en fase de rotación fueron aquellos que no excedieron su correspondiente ángulo máximo de giro, como muestra la Tabla 4.17, fueron todos aquellos de esbeltez 4 para un FA de 1.5 y sólo aquellos de mayores dimensiones para un FA de 2, además permanecieron en fase de rotación todos los cuerpos de esbeltez 6 para un FA de 1 y sólo el de dimensiones más grandes para los FA de 1.5 y 2.

Tabla 4.18. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Convict.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	1.5x0.25	0.6x0.1
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	0.6x0.1	SR

Los cuerpos que se volcaron fueron aquellos que excedieron su ángulo crítico de rotación, resultó ser el cuerpo más pequeño de esbeltez 4 bajo un FA de 2 al igual que el de esbeltez 6.

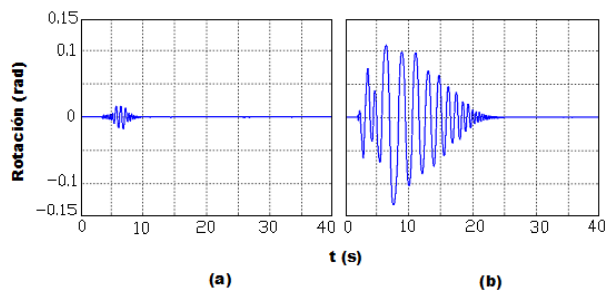


Figura 4.18. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 5 (2.5m x 0.5m). a) FA 1, b) FA 2.

En la Figura 4.18 se muestra el cuerpo de esbeltez 5 sometido a diferentes niveles de FA, se observa como en la Figura 4.18(a) el cuerpo resultó ser más estable, ya

que sólo se aplicó un FA de 1,5 y adquirió pequeños ángulos de rotación, por otro lado en la Figura 4.18b al aplicarle un FA de 2 el cuerpo alcanzó mayores niveles de rotación.

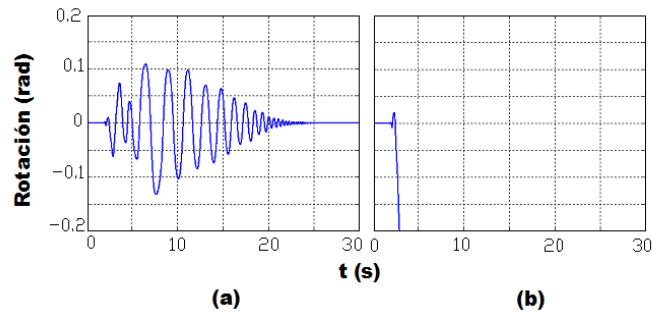


Figura 4.19. Cuerpos de esbeltez 5 sometidos a FA 2. a) 2.5m x 0.5m (rotación). b) 1m x 0.2m (volcamiento).

En la Figura 4.19 se muestra la respuesta de cuerpos de esbeltez 5, sometidos a un FA de 2, se muestra en la Figura 4.19(a) como el cuerpo de mayores dimensiones sólo experimentó la fase de rotación, sin embargo el cuerpo de menores dimensiones mostrado en la Figura 4.19(b) se volcó.

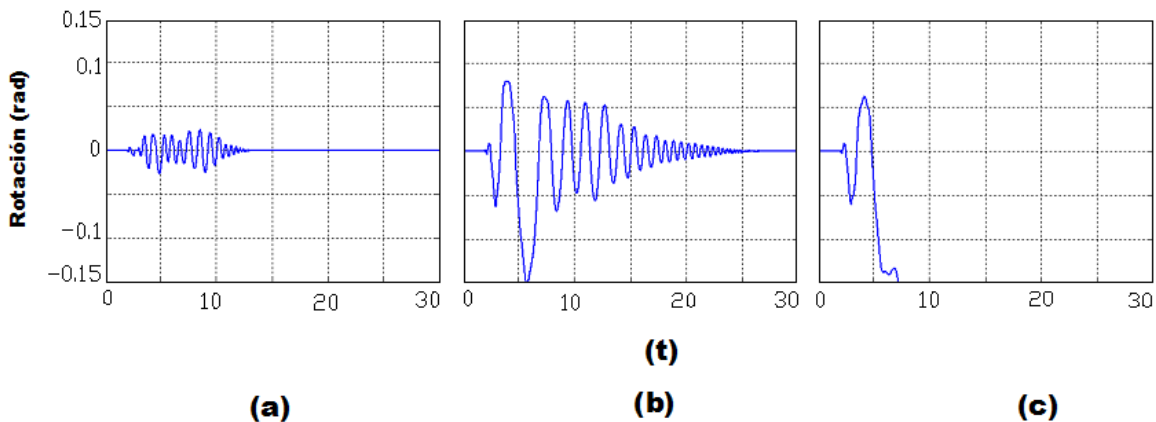


Figura 4.20. Cuerpos sometidos a un FA 2. a) 4m x 1m (rotación). b) 6m x 1m (rotación). c) 7m x 1m (volcamiento).

En la Figura 4.20 se muestra la respuesta de cuerpos de diferentes esbelteces, se observa en la Figura 4.20(a) como el cuerpo de esbeltez 4 experimenta menores

ángulos de rotación que el cuerpo de esbeltez 6 mostrado en la Figura 4.20(b), por otro lado el cuerpo de esbeltez 7 mostrado en la Figura 4.20(c) se vuelca.

#### 4.2.6. Izmit Kocaeli, Turquía

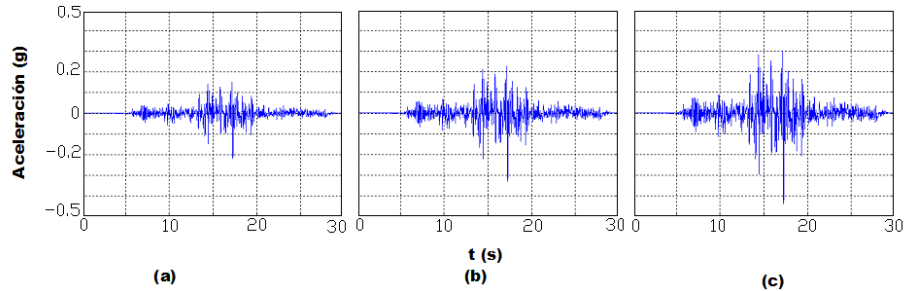


Figura 4.21. Registro de aceleraciones. a) FA 1, b) FA 1.5, c) FA 2.

Tabla 4.19. Cuerpos que experimentaron reposo durante acelerograma de Izmit.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	4x2	4x2	4x1	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.25	1x0.25	1x0.25	1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	0.2x0.1	0.2x0.1	0.4x0.1	SR	SR	SR	SR	SR

Durante el transcurso de las aceleraciones de Izmit, permanecieron en reposo los cuerpos de esbeltez 2 para los FA de 1, 1.5 y 2, además los cuerpos de esbeltez 4 para el FA de 1, ya que la máxima aceleración generada fue de 0.22g para el FA de 1, la cual no fue suficiente para iniciar la rotación en cuerpos de esbeltez 4 que necesitan 0.25g.

Tabla 4.20. Cuerpos que experimentaron rotación durante acelerograma de Izmit.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	4x1	4x1	6x1	6x1	6x1
SR	SR	SR	SR	1x0.25	1x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25
SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	0.4x0.1	0.6x0.1		

Los cuerpos que permanecieron en fase de rotación fueron aquellos que no excedieron su correspondiente ángulo máximo de giro, como lo muestra la Tabla 4.21. Gran parte de los cuerpos ensayados permanecieron en fase de rotación debido a los bajos niveles de aceleraciones proporcionados, aun cuando fueron aumentados sus FA al doble.

Tabla 4.21. Cuerpos que experimentaron volcamiento durante acelerograma de Izmit.

h/b=2			h/b=4			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	0.6x0.1	0.6x0.1

Los cuerpos que se volcaron fueron sólo aquellos de esbeltez 6, pero sólo los de menores dimensiones.

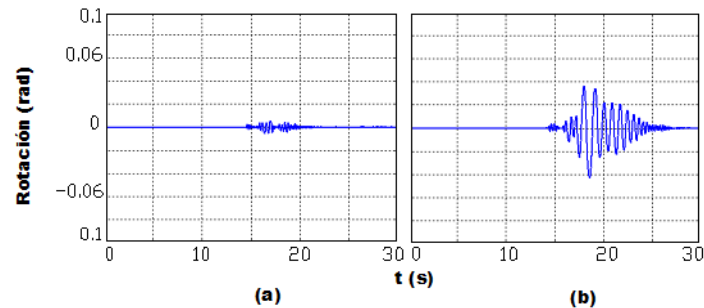


Figura 4.22. Rotación de cuerpos rígidos de esbeltez 5 (2.5m x 0.5m). a) FA 1.5, b) FA 2.

En la Figura 4.22 se muestra la respuesta del cuerpo de esbeltez 5 sometidos a FA de 1.5 y 2, se observa en la Figura 4.22(a), como el cuerpo responde de manera más estable alcanzando menores niveles de rotación cuando el FA es menor, por el contrario el cuerpo adquiere mayores rotaciones a mayores niveles de aceleraciones como se muestra en la Figura 4.22(b).

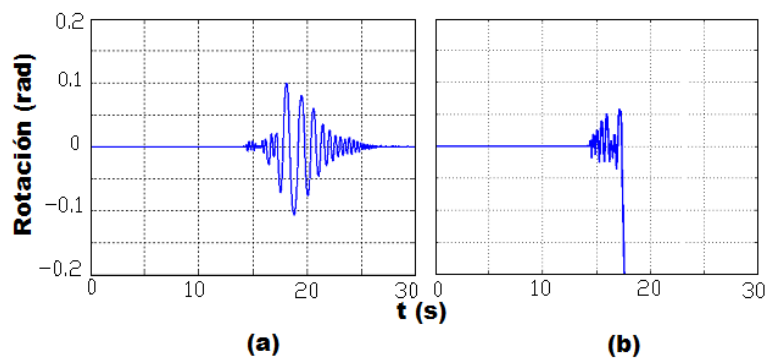


Figura 4.23. Cuerpos de esbeltez 5 sometidos a FA 2. a) 1m x 0.2m (rotación). b) 0.5m x 0.1 m (volcamiento).

En la Figura 4.23 se muestra la respuesta de cuerpos de esbeltez 5 sometidos a un FA de 2, se observa en la Figura 4.23(a) como el cuerpo de dimensiones 1m x 0.2m responde de mejor manera, permaneciendo sólo en fase de rotación que el cuerpo de dimensiones 0.5m x 0.1m mostrado en la Figura 4.23(b), el cual se vuelca.

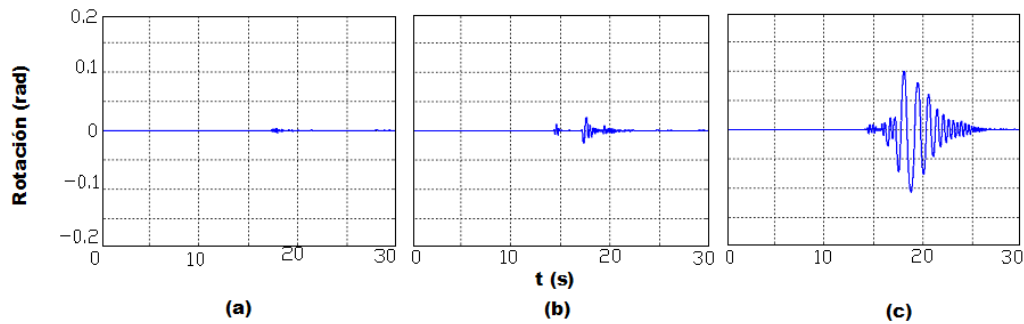


Figura 4.24. Cuerpos sometidos a FA 1.5. a) 4m x 1m (rotación), b) 6m x 1m (rotación), c) 7m x 1m (volcamiento).

En la Figura 4.24 se muestra la respuesta de cuerpos de diferentes esbelteces, sometidos a un FA de 1.5, se observa en la Figura 4.24(a) como el cuerpo de esbeltez 4 adquiere menores ángulos de rotación, que los cuerpos de esbeltez 6 y 7 mostrados en las Figuras 4.24(b) y (c) respectivamente.

### 4.3. Resumen de Resultados

Los resultados obtenidos en el presente capítulo, vienen a validar los encontrados en el Capítulo 3, donde los cuerpos fueron excitados mediante señales armónicas.

Al igual como se verificó el factor de escala para cuerpos excitados mediante aceleraciones armónicas, al excitar con aceleraciones registradas durante los sismos, se encontró que aquellos cuerpos que comparten la misma esbeltez, pero con dimensiones mayores, son más estables frente el fenómeno de volcamiento que los de dimensiones más pequeñas. Como ejemplo se comenta que para el registro de El Centro se muestra en la Figura 4.3 cuerpos de esbeltez 3 sometidos a un FA de 1.5. Se muestra en la Figura 4.3(a) que el cuerpo de dimensiones 3m x 1m experimenta sólo rotación, y en la Figura 4.3(b) que el cuerpo de 1.5m x 0.5m se vuelca, el mismo resultado puede ser observado para el registro de aceleraciones de Chi-Chi, donde se muestra en la Figura 4.15 los cuerpos de esbeltez 6 sometidos a un FA de 1.5. En la Figura 4.15(a) el cuerpo de dimensiones 6m x 1m experimenta rotación y en la Figura 4.15(b) el cuerpo de 3m x 0.5 m se vuelca.

Al igual como se observó que la esbeltez juega un papel importante al excitar los cuerpos con señales armónicas en el Capítulo 3, en el presente capítulo se observó que los cuerpos de esbelteces elevadas, están más propensos a volcarse que cuerpos de esbelteces menores. Como ejemplo se comenta que este fenómeno puede ser visualizado en la Figura 4.24 donde se excitan cuerpos a un FA de 1.5 en el registro de aceleraciones de Izmit. Se observa como el cuerpo de esbeltez más pequeña (4), adquiere ángulos menores de rotación que los cuerpos de esbeltez 6 y 7, ya que a medida que se incrementó la esbeltez, también fueron incrementadas las respuestas de los cuerpos, experimentando mayores ángulos de rotación e incluso alcanzando el volcamiento como se muestra en la Figura 4.20 para el registro de aceleraciones de Convict y un FA de 1.5, donde se observa que el cuerpo de esbeltez 4 adquiere menores ángulos de rotación que el cuerpo de esbeltez 6, por otro lado el cuerpo de esbeltez 7 se vuelca.

El FA modificado para los registros conlleva un aumento en la magnitud de las aceleraciones de los mismos. A medida que se incrementó el FA, los registros fueron capaces de inducir el movimiento de rotación en cuerpos con esbelteces que para un FA de 1 permanecían en reposo y lograron volcar cuerpos que sólo permanecían en fase de rotación. En las Figuras 4.25 - 4.27 se muestran las curvas de volcamiento para los registros analizados en el capítulo y sus FA modificadas. Se debe notar que  $h$  representa la altura del centro de masa de los cuerpos y  $b$  el semi

ancho de la base. Por sobre las curvas implica volcamiento y bajo las curvas rotación o reposo indistintamente (estabilidad).

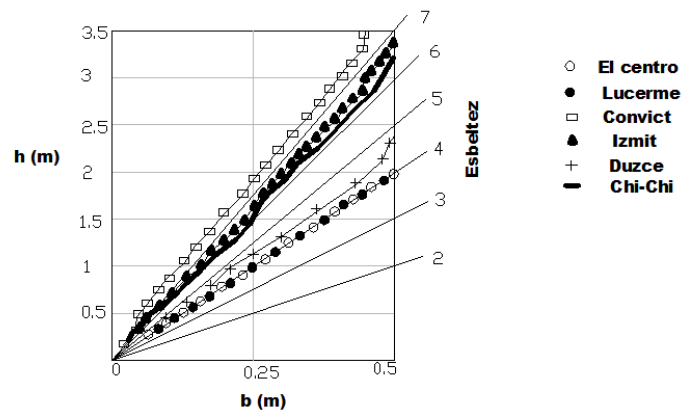


Figura 4.25. Curvas de volcamiento para los registros analizados. FA 1.

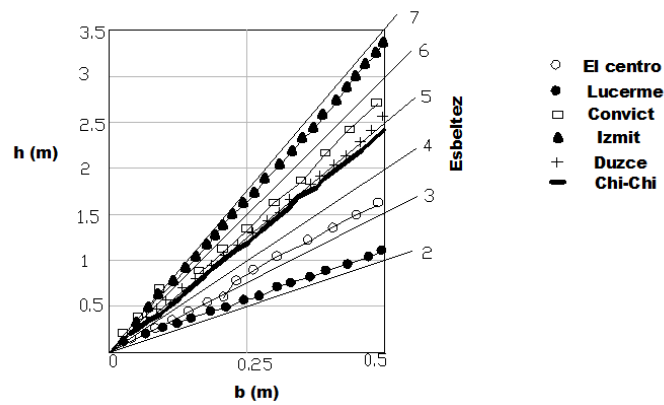


Figura 4.26. Curvas de volcamiento para los registros analizados. FA 1.5.

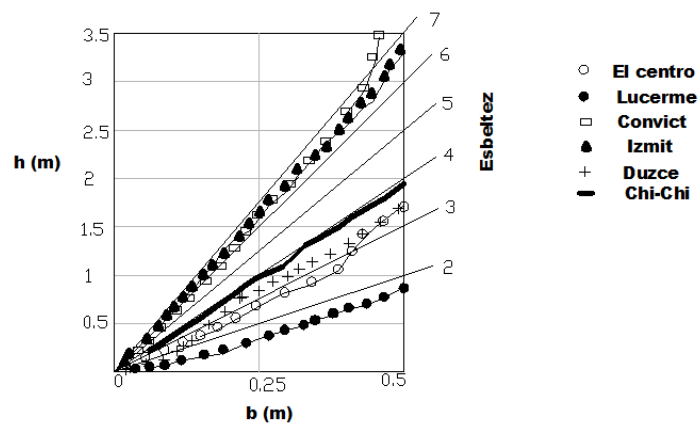


Figura 4.27. Curvas de volcamiento para los registros analizados. FA 2.

# 5. Sistema de Protección para Cuerpos Rígidos

## 5.1. General

En el presente capítulo se establece un dispositivo de aislamiento pasivo del tipo masa, resorte, amortiguador (M, K, C), en cuerpos con densidad de  $2000 \frac{kg}{m^3}$  y espesores igual al ancho de la base, variando parámetros del dispositivo como el periodo de aislación, con la intención de lograr disminuir las aceleraciones que afectan a los cuerpos rígidos. Se analiza la respuesta de cuerpos rígidos con esbelteces entre 2 y 7, y se comparan los resultados con los obtenidos para cuerpos rígidos ubicados sobre una base fija (libre), con la intención de verificar la eficiencia del sistema de aislamiento pasivo en cuerpos rígidos.

## 5.2. Sistema de Aislamiento

El cuerpo al estar en contacto directo con la base fija se ve afectado por las aceleraciones que esta genera, la inclusión de un sistema de aislación permite desligarlo de la base y, de esta manera, lograr que las aceleraciones que afectan al cuerpo ya no sean las aceleraciones basales, si no las aceleraciones del aislador, un esquema de la propuesta se muestra en la Figura 5.1.

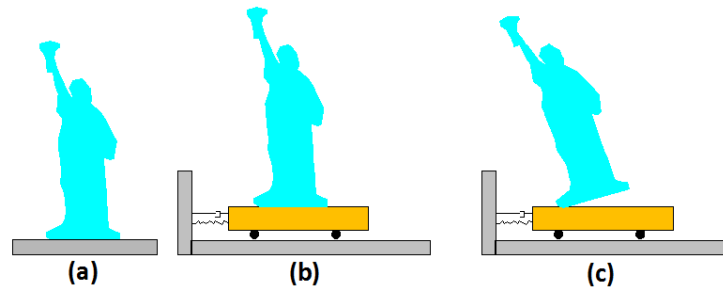


Figura 5.1. a) Cuerpo Rígido en reposo. b) etapa de contacto total. c) etapa de rotación.

### 5.2.1. Ecuaciones del movimiento

Las ecuaciones del movimiento que rigen el comportamiento de cuerpo rígido sobre el dispositivo de aislación que se mostró en la Figura 5.1, fueron planteadas por Di Egidio y Contento [7], utilizando un enfoque Lagrangiano para su deducción, y pueden separarse en dos movimientos.

El cuerpo rígido se mueve conjuntamente con el aislador sin ingresar en el movimiento de rotación, como se muestra en la Figura 5.2.

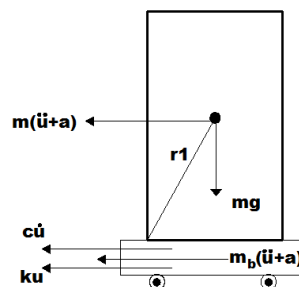


Figura 5.2. Identificación de las fuerzas actuantes en el sistema durante la etapa de contacto total.

$$(m + m_b) \cdot (\ddot{u} + a) + c\dot{u} + ku = 0 \quad (5.1)$$

Dónde:

$\ddot{u}$  : aceleración relativa al suelo.

$m$ : masa del cuerpo rígido.

$m_b$ : masa de la base.

$a$ : aceleración absoluta del terreno del terreno.

El cuerpo rígido inicia el movimiento de rotación, como se muestra en la Figura 5.1c. Cuando el cuerpo inicia el movimiento de rotación sobre el aislador se obtiene un movimiento de 2 grados de libertad, referidos al ángulo de rotación del cuerpo y al desplazamiento del aislador, por lo tanto para encontrar las variables de interés se debe utilizar un sistema de ecuaciones. Al igual que para el movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre una base fija, las ecuaciones se dividen cuando el cuerpo rota en torno al vértice izquierdo y al derecho, un esquema de las fuerzas actuantes sobre el sistema se muestra en la Figura 5.3.

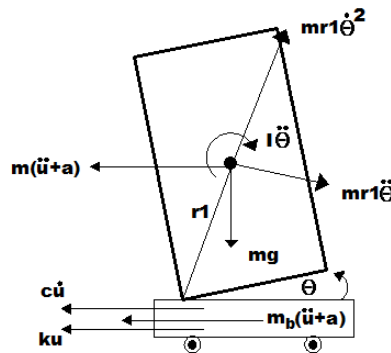


Figura 5.3. Identificación de las fuerzas actuantes en el sistema cuando el cuerpo rígido rota sobre el aislador.

Cuando el cuerpo rota en torno al vértice izquierdo.

$$(m + m_b) \cdot (\ddot{u} + a) + c\dot{u} + ku - m \cdot \ddot{\theta} \cdot r_1 \cdot \cos(\theta_{c1} - \theta) - m \cdot \dot{\theta}^2 \cdot r_1 \cdot \sin(\theta_{c1} - \theta) = 0$$

$$I_1 \cdot \ddot{\theta} - m \cdot (\ddot{u} + a) \cdot r_1 \cdot \cos(\theta_{c1} - \theta) + m \cdot g \cdot r_1 \cdot \sin(\theta_{c1} - \theta) = 0 \quad (5.2)$$

Este sistema de ecuaciones puede ser reordenado para encontrar las variables a integrar.

$$\ddot{u} = \frac{-p_1^2 \gamma r_1 \sin(\theta_{c1} - \theta) \cos(\theta_{c1} - \theta) - 2\epsilon w n \dot{u} - w n^2 u + \gamma \dot{\theta}^2 r_1 \sin(\theta_{c1} - \theta)}{1 - \frac{p_1^2 \cos^2(\theta_{c1} - \theta) \gamma r_1}{g}} - a$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\gamma \dot{\theta}^2 r_1 \sin(\theta_{c1} - \theta) \cos(\theta_{c1} - \theta) - \sin(\theta_{c1} - \theta) g - w n^2 u \cos(\theta_{c1} - \theta) - 2\epsilon w n \dot{u} \cos(\theta_{c1} - \theta)}{\frac{g}{p_1^2} - \gamma r_1 \cos^2(\theta_{c1} - \theta)}$$

Cuando el cuerpo rota en torno al vértice derecho.

$$(m + mb) \cdot (\ddot{u} + a) + c\dot{u} + ku - m \cdot \ddot{\theta} \cdot r_2 \cdot \cos(\theta_{c2} + \theta) - m \cdot \dot{\theta}^2 \cdot r_2 \cdot \sin(\theta_{c2} + \theta) = 0$$

$$I_2 \cdot \ddot{\theta} - m \cdot (\ddot{u} + a) \cdot r_2 \cdot \cos(\theta_{c2} + \theta) - m \cdot g \cdot r_2 \cdot \sin(\theta_{c2} + \theta) = 0 \quad (5.3)$$

Este sistema puede ser reordenado para encontrar las variables que se deben integrar.

$$\ddot{u} = \frac{p_2^2 \gamma r_2 \sin(\theta_{c2} + \theta) \cos(\theta_{c2} + \theta) - 2\epsilon w n \dot{u} - w n^2 u + \gamma \dot{\theta}^2 r_2 \sin(\theta_{c2} + \theta)}{1 - \frac{p_2^2 \cos^2(\theta_{c2} + \theta) \gamma r_2}{g}} - a$$

$$\ddot{\theta} = \frac{\gamma \dot{\theta} r_2 \sin(\theta_{c2} + \theta) \cos(\theta_{c2} + \theta) + \sin(\theta_{c2} - \theta) g - w n^2 u \cos(\theta_{c2} + \theta) - 2\epsilon w n \dot{u} \cos(\theta_{c2} + \theta)}{\frac{g}{p_2^2} - \gamma r_2 \cos^2(\theta_{c2} + \theta)}$$

Dónde:

$a$ : aceleración absoluta del terreno.

$\ddot{\theta}$ : aceleración angular del cuerpo rígido.

$\ddot{u}$ : aceleración relativa al suelo.

$m$ : masa del cuerpo rígido.

$m_b$ : masa de la base.

$c$ : coeficiente de amortiguamiento.

$k$ : rigidez.

$r_1 - r_2$ : distancia diagonal desde el centro de masa hasta la esquina de giro.

$\theta_{c1} - \theta_{c2}$ : ángulo crítico de giro.

$I_1 - I_2$ : Inercia con respecto al punto de giro.

$g$ : aceleración de gravedad.

$$\gamma : \frac{m}{mb+m}$$

$$wn : \sqrt{\frac{k}{m+m_b}}$$

$$p_2^2 : \frac{m \cdot g \cdot r_2}{I_2}$$

$$p_1^2 : \frac{m \cdot g \cdot r_1}{I_1}$$

$m \cdot \dot{\theta}^2 \cdot r_1 - m \cdot \dot{\theta}^2 \cdot r_2$ : fuerza centrífuga actuando en el cuerpo debido a la velocidad angular.

$m \cdot \ddot{\theta} \cdot r_1 - m \cdot \ddot{\theta} \cdot r_2$ : inercia traslacional debido a la aceleración rotacional.

El movimiento es iniciado cuando el momento externo supera al momento restituyente ejercido por el peso del cuerpo, como se muestra en la ecuación 5.4.

$$m \cdot g \cdot b < (\ddot{u} + a) \cdot m \cdot h \quad (5.4)$$

Por lo tanto para que el cuerpo inicie el movimiento de rotación la aceleración ejercida sobre el cuerpo debe ser mayor que una fracción de la aceleración de gravedad, siempre bajo la consideración que  $h$  es mínimo 2 veces más grande que  $b$ .

$$\frac{g \cdot b}{h} < (\ddot{u} + a)$$

### 5.2.2. Respuesta de sistemas con aislación

Para verificar la eficiencia del aislamiento en cuerpos rígidos se analizaron los registros sísmicos que se muestran en la Tabla 5.1 y 5.2 realizando dos enfoques.

- 1) Se analizó la respuesta de cuerpos rígidos excitados por las aceleraciones con las magnitudes de las aceleraciones que se registraron en la estación de medición.
- 2) Se analizó la respuesta de cuerpos rígidos excitados por las aceleraciones registradas, pero se modificaron mediante un FA, de tal manera que todos los registros usados sean capaces de iniciar la rotación en cuerpos rígidos de esbeltez 2 sobre una base fija. Esto se realizó, ya que los registros presentados en la Tabla 5.1 no poseen grandes magnitudes de aceleración y en su mayoría no lograban sacar del reposo a los cuerpos entre esbelteces 2 y 5.

Tabla 5.1. Registro de aceleraciones sin modificación de las aceleraciones.

Nombre	Fecha	PGA (g)
Convict Creek, USA	25/05/1980	0.21
Izmit Kocaeli, Turquía	17/08/1999	0.22
Chi-Chi, Taiwán	20/09/1999	0.23
El Centro Imperial Valley, USA	15/10/1979	0.41
Duzce, Turquía	12/11/1999	0.35
Lucerne Landers, USA	28/06/1992	0.73

Tabla 5.2. . Registro con modificación de aceleraciones.

Nombre	Fecha	FA	PGA (g)
Convict Creek, USA	25/05/1980	3	0.63
Izmit Kocaeli, Turquía	17/08/1999	3	0.66
Chi-Chi, Taiwán	20/09/1999	3	0.69
El Centro Imperial Valley, USA	15/10/1979	1.5	0.61
Duzce, Turquía	12/11/1999	1.5	0.52
Lucerme Landers, USA	28/06/1992	1.5	1.09

El análisis se realizó considerando una razón de amortiguamiento del 10 % del amortiguamiento crítico. Las tablas que se muestran a continuación resumen el comportamiento adquirido por cada uno de los cuerpos analizados, cuando fueron sometidos a los registros con y sin modificación de las magnitudes de las aceleraciones, además cuando el cuerpo estuvo ubicado sobre una base fija y cuando se ubicó sobre las diferentes configuraciones de aisladores, considerando periodos objetivos de 2.5 (s), 3(s), 3.5 (s) y 4(s), se debe resaltar que sólo se consideró hasta 4 (s) de periodo aislado aun cuando dichos periodos no le proveen seguridad a todos los cuerpos de análisis, esto se realizó, ya que para el registro de Concepción, que se analizará más adelante, fue suficiente considerar un periodo de aislación de 4(s), para asegurar la estabilidad de todos los cuerpos analizados.

Tabla 5.3. Respuesta del cuerpo de esbeltez 2 (2m x 1m), sin modificación de aceleraciones (l), con modificación de aceleraciones (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento.

Registro	Fija (l)	Fija (m)	2.5(l)	2.5 (m)	3(l)	3(m)	3.5(l)	3.5 (m)	4(l)	4 (m)
Izmit	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
El centro	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
Chi-Chi	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
Lucerme	O	O	R	R	R	R	R	R	R	R
Convict	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
Duzce	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R

En la Tabla 5.3 se muestran los comportamientos adquiridos por el cuerpo de dimensiones 2m x 1m. Se observa como al ser excitado por las aceleraciones sin considerar aumentos en las magnitudes de las aceleraciones permanece en reposo el cuerpo rígido con respecto a la interface de aislamiento para todos los registros con excepción de Lucerme. Esto es debido a que este registro fue el único que generó magnitudes de aceleración sobre los 0.5g que es la aceleración necesaria para iniciar la rotación en cuerpo de esbeltez 2. Además al disponer las diferentes configuraciones de aislación, se observó que el cuerpo permaneció en reposo, para todos los registros, debido a que la inclusión del aislador logró disminuir las aceleraciones absolutas que lo afectaron. Por otro lado, cuando el cuerpo fue excitado por los registros de las aceleraciones modificadas, se observa como

adquiere la etapa de rotación para todos los registros, esto es debido a que precisamente esa fue la consideración de la modificación de las aceleraciones. Sin embargo, al disponer las diferentes configuraciones de aislación se observaron reducciones en las aceleraciones hasta bajo los 0.5g, debido a esto, el cuerpo permaneció en reposo para todos los registros aun cuando fueron aumentadas las magnitudes de las aceleraciones.

Tabla 5.4. Respuesta del cuerpo de esbeltez 3 (3m x 1m), sin modificación de aceleraciones (), con modificación de aceleraciones (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento.

Registro	Fija ()	Fija (m)	2.5()	2.5 (m)	3()	3(m)	3.5()	3.5 (m)	4()	4 (m)
Izmit	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
El centro	O	O	R	V	R	V	R	R	R	R
Chi-Chi	R	V	R	V	R	R	R	R	R	R
Lucerne	O	O	R	V	R	V	R	V	R	V
Convict	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
Duzce	O	O	R	R	R	R	R	R	R	R

En la Tabla 5.4 se observan los comportamientos adquiridos por el cuerpo de dimensiones 3m x 1m. Se observa como al estar ubicado sobre una base fija adquiere el comportamiento de rotación para 3 registros (El Centro, Lucerne y Duzce). Esto es debido a que esos registros generaron magnitudes mayores a 0.33g que es la necesaria para iniciar la rotación en cuerpos de esbeltez 3. Al disponer las configuraciones de aislación se observó un descenso de las aceleraciones bajo los 0.33g. Es debido a esto que el cuerpo permaneció en reposo para todos los registros. Por otro lado, al modificar las aceleraciones se observa como el cuerpo es sacado del reposo para todos los registros, además alcanza el volcamiento para el registro de Chi-Chi. Cuando se dispusieron las configuraciones de aislación se observaron resultados muy diversos, por un lado se observa como para el registro de Chi-Chi el cuerpo aun vuelca cuando se utiliza un periodo de aislación de 2.5 (s), aun cuando se reducen las aceleraciones que lo afectan. Esto es debido a que ese descenso de las aceleraciones viene acompañado por un alargamiento en el periodo de las mismas, lo cual como se mostró en capítulos anteriores resulta perjudicial en el fenómeno de rotación de cuerpos rígidos. Sin embargo, al establecer periodos mayores de aislación (3(s), 3.5 (s) y 4(s)), se observó que el cuerpo permaneció en reposo debido al descenso de las aceleraciones bajo el nivel necesario para iniciar la rotación. También se pudo observar que la inclusión del aislador (T= 2.5 (s) y T=3 (s)) resultó perjudicial en los registros de El Centro y Lucerne. Esto debido a que aun cuando disminuyen las aceleraciones que afectan al cuerpo alargan el periodo de las aceleraciones, lo cual resulta perjudicial haciendo que el cuerpo vuelque, aun cuando sólo experimentaban la fase de rotación al estar sobre una base fija. En específico para el registro del Centro, el cual es considerado un terremoto de

carácter impulsivo, la aislación sísmica no resulta tan efectiva en la reducción de las aceleraciones basales, es por esta razón que al no generar grandes reducciones de aceleraciones, pero si alargar el periodo de la excitación genera resultados poco beneficiosos en los cuerpos rígidos. Sin embargo la presente tesis no busca profundizar en la eficiencia de la aislación sísmica en los diferentes tipos de terremotos, por lo cual no se profundiza en el tema.

Tabla 5.5. Respuesta del cuerpo de esbeltez 4 (4m x 1m), sin modificación de aceleraciones (), con modificación de aceleraciones (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento.

Registro	Fija ()	Fija (m)	2.5()	2.5 (m)	3()	3(m)	3.5()	3.5 (m)	4()	4 (m)
Izmit	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
El centro	O	V	V	V	R	V	R	V	R	R
Chi-Chi	R	V	R	V	R	O	R	V	R	V
Lucerne	O	O	V	V	R	V	R	V	R	V
Convict	R	O	R	R	R	R	R	R	R	R
Duzce	O	O	R	O	R	O	R	O	R	R

En la Tabla 5.5 se observan los comportamientos adquiridos por el cuerpo de dimensiones 4m x 1m. Se observa como el cuerpo adquiere el movimiento de rotación al ser excitado por las aceleraciones sin modificar de El Centro, Lucerne y Duzce, debido a que esos registro generaron magnitudes sobre los 0.25g que es la aceleración necesaria para iniciar la rotación en cuerpos de esbeltez 4. Se puede observar como al incluir las configuraciones de aislación, resulta beneficioso en algunos casos (por ej. Duzce), manteniendo al cuerpo en reposo y evitando la rotación. Sin embargo se observa como resulta perjudicial en los registros de El Centro y Lucerne (T=2.5 (s)), debido a que el cuerpo vuelca. Por otro lado, cuando fueron modificadas las magnitudes de las aceleraciones se encontraron resultados más perjudiciales en el cuerpo al estar sobre una base fija (debido al incremento de las aceleraciones), alcanzando el volcamiento en 2 registros (El Centro y Chi-Chi). Sin embargo, al establecer configuraciones con un periodo de aislación alto se logró evitar que el cuerpo volcara (por ej. El Centro, T=4 (s)), ya que cuando se incluyeron periodos menores, el cuerpo aún se volcaba debido a que aun cuando las magnitudes de las aceleraciones absolutas percibidas por el cuerpo rígido fueron reducidas, el incremento del periodo de las mismas resultó ser perjudicial, volcando el cuerpo.

Tabla 5.6. Respuesta del cuerpo de esbeltez 5 (5m x 1m), sin modificación de aceleraciones (), con modificación de aceleraciones (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento.

Registro	Fija ()	Fija (m)	2.5()	2.5 (m)	3()	3(m)	3.5()	3.5 (m)	4()	4 (m)
Izmit	O	O	R	R	R	R	R	R	R	R
El centro	O	V	V	V	V	V	R	V	R	O
Chi-Chi	O	V	R	V	R	V	R	V	R	V
Lucerne	V	V	V	V	V	V	R	V	R	V
Convict	O	O	R	R	R	R	R	R	R	R
Duzce	O	O	R	V	R	V	R	V	R	R

En la Tabla 5.6 se muestran las etapas del movimiento adquiridas por el cuerpo de dimensiones 5m x 1m, se observa como al estar ubicado sobre una base fija, sale de su etapa de reposo para todos los registros, ya que todos generan magnitudes sobre 0.2g, alcanzando el volcamiento para el registro de Lucerme. Cuando se disponen las configuraciones de aislación se observa como resultan beneficiosas en la mayoría de los registros con excepción de Lucerme, ya que ninguna de las configuraciones ensayadas para este terremoto logra evitar el volcamiento del cuerpo. Además, resulta perjudicial el periodo de aislación T=2.5 (s) en el registro de El Centro, ya que vuelca el cuerpo aun cuando sobre una base fija sólo rota. Por otro lado, cuando fueron aumentadas las magnitudes de las aceleraciones, se observó que el cuerpo vuelca para 3 registros (El Centro, Chi-Chi y Lucerme). Se puede observar como sólo se encontró que el dispositivo de aislación con periodo T=4 (s), logró evitar que el cuerpo volcara para el registro de El Centro, mas no hubo configuraciones ensayadas que entregaran un resultado similar en los registros de Chi-Chi y Lucerme. Además se observa como la configuración de T=2.5 (s), T=3 (s) y T=3.5 (s), resulta perjudicial en el registro de Duzce, debido a que el cuerpo sólo permanece en rotación estando sobre una base fija, y posterior a la inclusión del aislador con los periodos mostrados, el cuerpo vuelca.

Tabla 5.7. Respuesta del cuerpo de esbeltez 6 (6m x 1m), sin modificación de intensidad (O), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento.

Registro	Fija (l)	Fija (m)	2.5(l)	2.5 (m)	3(l)	3(m)	3.5(l)	3.5 (m)	4(l)	4 (m)
Izmit	O	O	R	R	R	R	R	R	R	R
El centro	V	V	V	V	V	V	V	V	R	V
Chi-Chi	O	V	R	V	R	V	R	V	R	V
Lucerme	V	V	V	V	V	V	V	V	R	V
Convict	O	O	R	O	R	R	R	R	R	R
Duzce	O	V	O	V	O	V	O	V	R	V

En la Tabla 5.7 se muestra la respuesta del cuerpo de dimensiones 6m x 1m, se observa como es sacado del reposo cuando esta sobre una base fija para todos los registro sin modificación de las aceleraciones. Además, este se vuelca para dos registros (El centro y Lucerme), debido a que el cuerpo es de gran esbeltez y la aceleración necesaria para iniciar la rotación es relativamente baja (0.16g). Cuando se establecieron las configuraciones de aislación se encontraron resultados poco alentadores, ya que debido a la gran esbeltez que posee, las reducciones de las aceleraciones generadas por el aislador deben ser de gran magnitud para evitar que el cuerpo ingrese en el movimiento de rotación. Esto se consiguió en los registros de Izmit, Convict y Chi-Chi, los cuales poseen menores valores de aceleración. Sin embargo, en los registros de Lucerme y El Centro no se encontraron configuraciones que pudieran asegurar la estabilidad del cuerpo, ya que aun

cuando las aceleraciones disminuyeron a medida que se incrementaba el periodo de aislación, se alargaban los periodos de las aceleraciones que afectaban al cuerpo, haciendo que se volcara. Por otro lado, al aumentar las aceleraciones, se encontró que el cuerpo alcanzó el volcamiento en cuatro registros (El Centro, Chi-Chi, Lucerne y Duzce). Además, se observó que ninguna de las configuraciones de aislación fue de utilidad para prevenir el volcamiento, esto debido a la gran esbeltez del cuerpo. Aun cuando se lograban disminuir la magnitud de las aceleraciones se alargaba el periodo de las mismas, generando el volcamiento.

Tabla 5.8. Respuesta del cuerpo de esbeltez 7 (7m x 1m), sin modificación de intensidad (I), con modificación de intensidad (m). R=reposo, O= rotación, V=volcamiento.

Registro	Fija (I)	Fija (m)	2.5(I)	2.5 (m)	3(I)	3(m)	3.5(I)	3.5 (m)	4(I)	4 (m)
Izmit	O	O	R	R	R	R	R	R	R	R
El centro	V	V	V	V	V	V	V	V	O	V
Chi-Chi	O	V	R	V	R	V	R	V	R	V
Lucerne	V	V	V	V	V	V	V	V	V	V
Convict	O	O	R	V	R	R	R	R	R	R
Duzce	V	V	V	V	V	V	V	V	R	V

En la Tabla 5.8 se muestran los comportamientos adquiridos por el cuerpo de dimensiones 7m x 1m. Este cuerpo es el de mayor esbeltez ensayada y debido a esto necesita las menores magnitudes de aceleración para salir del reposo (0.14g). Es por esta razón que adquiere el peor comportamiento cuando está ubicado sobre una base fija para los registros sin modificación de las aceleraciones, volcándose en la mitad de ellos (El Centro, Lucerne y Duzce). Cuando se dispusieron las configuraciones de aislación se genera un efecto similar al adquirido por los cuerpos de esbelteces altas (5 y 6), debido a que no se encontraron periodos de aislación para impedir que el cuerpo vuelque. Sin embargo, los periodos de aislación impidieron la rotación del cuerpo en los registros que poseen menores aceleraciones, donde las magnitudes de las aceleraciones lograron ser disminuidas bajo 0.14g (Izmit y Convict). Por otro lado al aumentar las aceleraciones el cuerpo sólo permanece en rotación al estar sobre una base fija para los registros de Izmit y Convict, para los cuales además adquiere la posición de reposo cuando se establecen las configuraciones de aisladores, con excepción del registro de Convict cuando se dispuso un periodo de aislación de 2.5 (s), debido a que aun cuando disminuyeron las aceleraciones no lo hicieron bajo 0.14g lo cual permitió que el cuerpo rotara y que fuera afectado por el alargamiento de los periodos haciendo que volcara. Por otro lado para los registros que poseen mayores aceleraciones (El Centro, Chi-Chi, Lucerne y Duzce) no se encontraron configuraciones de aisladores suficientes para impedir el volcamiento. Esto debido a la gran esbeltez del cuerpo, ya que a medida que se eligieron periodos más grandes de aislación, las

aceleraciones fueron disminuidas en mayor medida, sin embargo, el alargamiento del periodo resultó ser perjudicial haciendo que el cuerpo volcara.

En las siguientes figuras se muestra la respuesta de cuerpos rígidos en el tiempo, donde se observa el comportamiento perjudicial que en ocasiones puede causar la inclusión del aislador debido al incremento en el periodo de la excitación, aun cuando se logren reducir las magnitudes de las aceleraciones.

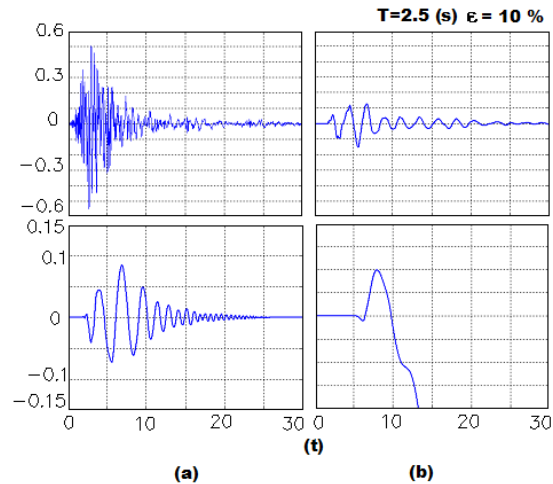


Figura 5.4. Registro de Convict, cuerpo de 7m x 1m, periodo de aislación de 2.5 (s), sobre la base fija el cuerpo permanece en rotación y vuelca al estar sobre el aislador.

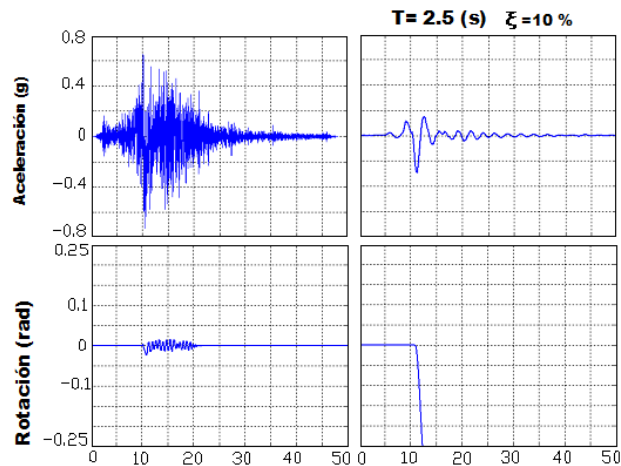


Figura 5.5. Registro de Lucerne, cuerpo de 4m x 1m, periodo de aislación 2.5 (s), sobre la base fija el cuerpo permanece en rotación, y vuelca al estar sobre el aislador.

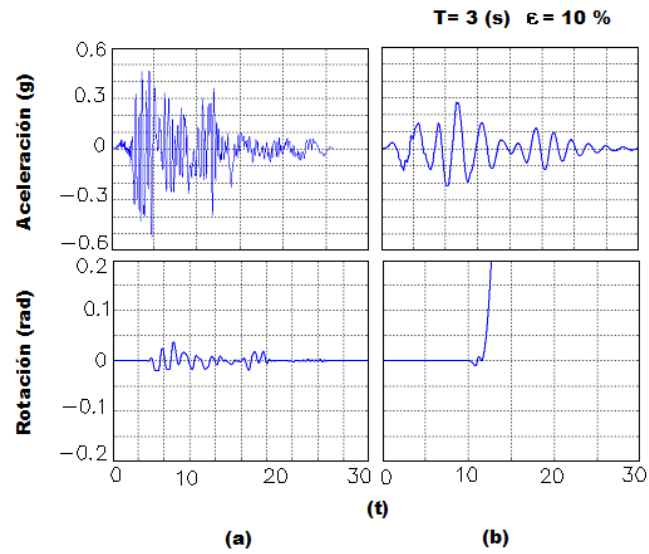


Figura 5.6. Registro de Duzce, cuerpo de dimensiones 5m x 1m, periodo de aislación 3(s), sobre la base fija el cuerpo permanece en rotación y vuelca al estar sobre el aislador.

### 5.3. Registro de Aceleraciones Concepción 27 / F

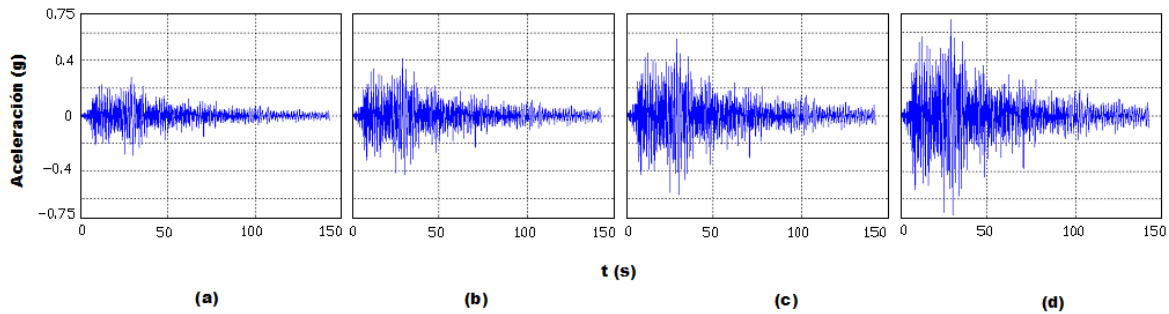


Figura 5.7. Registro de aceleraciones, estación Concepción centro, dirección norte- sur. a) FA 1, PGA (0.28g), b) FA 1.5, PGA (0.42g), c) FA 2, PGA (0.57g), c) FA 2.5 PGA (0.73g).

Los resultados obtenidos para los cuerpos rígidos de dimensiones entre 2m y 7m de altura, sujetos a las aceleraciones de Concepción, con amplificaciones de las aceleraciones como se muestra en la Figura 5.7, se presentan en las figuras siguientes, para variaciones del periodo de aislación y 10 % del amortiguamiento crítico.

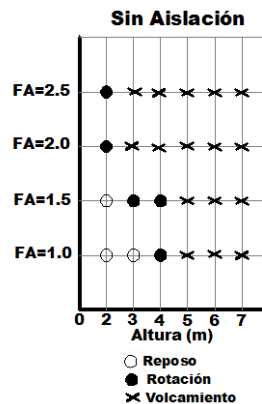


Figura 5.8. Gráfico de las etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre base fija, sujetos a aceleraciones de Concepción.

En la Figura 5.8 se muestran las respuestas de los cuerpos analizados, se observa como para un FA de 1 los cuerpos de esbeltos a partir de 5 vuelcan. Esto se debe a que los periodos característicos de las aceleraciones del registro se encuentran alrededor de los 1 y 2 segundos (ver anexo A), como se mostró anteriormente, los cuerpos se comportan de peor manera el ser excitado por periodos más largos.

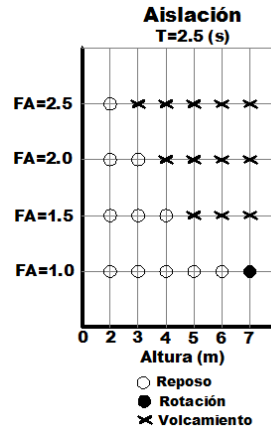


Figura 5.9. Gráfico de etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre aislador con periodo de aislación de 2.5 (s), sujeto a las aceleraciones Concepción.

En la Figura 5.9 se muestran las respuestas de los cuerpos rígidos analizados. Se observa como el cuerpo de esbeltez 2 permanece en reposo para todas las FA, debido a que estas disminuyeron bajo 0.5g. Además, se muestra un comportamiento muy estable de todos los cuerpos cuando el registro posee un FA de 1. Por otro lado se debe resaltar que los cuerpos de esbeltez 5, 6 y 7 vuelcan para FA superiores a 1.

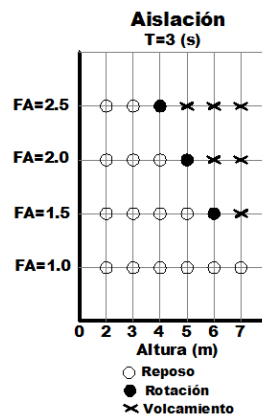


Figura 5.10. Gráfico de etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre aislador con periodo de aislación de 3 (s), sujeto a las aceleraciones Concepción.

En la Figura 5.10 se muestran las respuestas de los cuerpos analizados. Se observa como el comportamiento ahora es mucho más estable. Se observa como los cuerpos de esbeltez 2 y 3 permanecen en reposo para todas las intensidades del registro. Se observa como el área de rotación de los cuerpos se reduce, debido al alargamiento de los periodos de las excitaciones. Esto implica que el cuerpo tiene más posibilidades de permanecer en reposo o volcar.

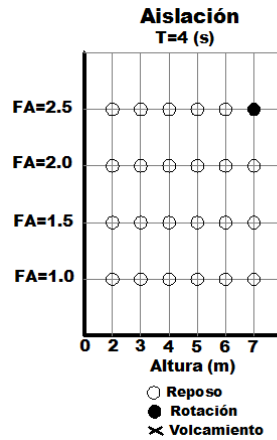


Figura 5.11. Gráfico de etapas del movimiento de rotación de cuerpos rígidos sobre aislador con periodo de aislación de 4 (s), sujeto a las aceleraciones Concepción.

En la Figura 5.11 se muestra como la inclusión del dispositivo de aislación fue completamente efectiva, debido a que todos los cuerpos permanecieron en reposo, con excepción del cuerpo de esbeltez 7 para un FA de 2.5 del registro, el cual experimento el movimiento de rotación.

## 6. Resumen y Conclusiones

### 6.1. Resumen

El objetivo del estudio fue evaluar la respuesta de rotación de elementos considerados como cuerpos rígidos al estar sobre una base fija, y además, evaluar la seguridad que le proporciona un sistema de aislación sísmica de un grado de libertad del tipo M, K, C, frente al fenómeno de volcamiento. Durante el presente estudio se mostró que los cuerpos rígidos se comportan de manera caótica. Lograr conocer el comportamiento del cuerpo previo a la aplicación de la excitación aun no es posible y sólo se puede predecir si este ingresará o no en la etapa de rotación. Cuando los cuerpos ingresan en la etapa de rotación, exhiben comportamientos que pueden ser definidos a partir de sus propiedades geométricas, tales como la esbeltez. Se mostró que cuerpos más esbeltos responden de peor manera frente al fenómeno de rotación, alcanzando antes el volcamiento. El factor de escala, que hace alusión a cuerpos que comparten la misma esbeltez, pero tienen diferente tamaño, evidencia que cuerpos de tamaño más pequeño responden de peor forma, alcanzando ángulos mayores de rotación e incluso el volcamiento. También se estudió la influencia del periodo de excitación, demostrándose que periodos de excitación más largos resultan perjudiciales para los cuerpos rígidos.

Para evaluar la efectividad del sistema de aislación se eligieron 6 registros sísmicos históricos, sólo considerando las aceleraciones horizontales, además del registro de Concepción del 27/F. Los ensayos fueron llevados a cabo al igual que para los cuerpos ubicados sobre una base fija, utilizando un código desarrollado en MATLAB. Se integraron las ecuaciones del movimiento utilizando el método Runge-Kutta de 4to orden y un paso de tiempo de 0.005 (s). Llegando a la conclusión que utilizar un sistema de aislamiento pasivo genera resultados beneficiosos y perjudiciales sobre el movimiento de rotación de cuerpos rígidos, debido que genera reducción de las aceleraciones, pero también se producen alargamiento de los periodos de excitación. Por esta razón el dispositivo de aislación debe ser seleccionado cuidadosamente.

## 6.2. Conclusión

Establecer sistemas de aislamiento pasivo en cuerpos rígidos genera efectos beneficiosos y perjudiciales en el comportamiento que estos adquieren en el movimiento de rotación.

Establecer un sistema de aislamiento pasivo en cuerpos rígidos, con un periodo adecuado de aislación, permite reducir la magnitud de las aceleraciones absolutas por las que el cuerpo se ve afectado en comparación de su condición de base fija. Esto resulta beneficioso, ya que como se mostró en los Capítulos 3 y 4, los cuerpos adquieren mayores ángulos de rotación cuando son afectados por mayores magnitudes de aceleración. Además, resulta beneficioso desde el punto de vista del inicio del movimiento de rotación de cuerpos rígidos, ya que para iniciar el movimiento de rotación, sólo cobra importancia la magnitud de las aceleraciones por las que el cuerpo se ve afectado. Es decir, si el terreno le proporciona una determinada magnitud de aceleración a un cuerpo rígido al estar sobre una base fija, logrando que este inicie el movimiento de rotación, al estar sobre un aislador el terreno deberá generar mayores magnitudes de aceleración para lograr iniciar dicho movimiento, siempre considerando que el sistema de aislación que se eligió cumple de manera correcta su función, es decir, reducir la aceleraciones absolutas que afectan el cuerpo rígido.

Establecer un sistema de aislamiento pasivo en cuerpos rígidos, además de disminuir las magnitudes de las aceleraciones por las que el cuerpo se ve afectado, causa un efecto perjudicial. Este es el alargamiento del periodo de la excitación. Tal como se mostró en los Capítulos 3 y 4, los cuerpos responden de peor forma frente a señales de periodos más largos, alcanzando mayores ángulos de rotación e incluso alcanzando antes el volcamiento. Aun cuando las magnitudes de las aceleraciones de periodos largos sean menores que las de periodos cortos, el cuerpo puede exhibir peores comportamientos (volcar) debido al alargamiento del periodo que produce el aislador. Esto hace que sea fundamental la elección de un periodo correcto de aislación, ya que aun cuando el periodo de aislación cumpla su función, es decir reducir los niveles de aceleraciones que actúan sobre el cuerpo, el cuerpo puede volcar, aun si estando sobre una base fija sólo permaneció en la etapa de rotación.

En esta tesis el análisis de cuerpos con aisladores, fue conducido en cuerpos con dimensiones desde 2m a 7m de altura, siempre considerando 1m de ancho de base (esbelteces entre 2 y 7). Es claro que comúnmente se pueden observar cuerpos entre 2m a 4m de altura simplemente apoyados, a diferencia de cuerpos entre 5m a 7m de altura, los que comúnmente poseen fundaciones que amplían su base de

apoyo. Sin embargo, es más común ver cuerpos de 50 cm a 70 cm de altura con bases de 10 cm. Este tipo de cuerpos responden de peor forma que su símil de dimensiones más grandes e igual esbeltez. Es por esta razón que se estudiaron cuerpos de grandes dimensiones, encontrando que la respuesta frente a los registros de sismos históricos fue poco alentadora, ya que ninguna de las configuraciones de aislación utilizadas logró proveerles seguridad frente al volcamiento. Esto hace pensar que en cuerpos de grandes esbelteces, tales como figuras humanas, obeliscos, y otros similares que pueden analizarse como cuerpo rígido, no resulta beneficioso la inclusión de este tipo de dispositivos de aislación, ya que aun cuando se logra disminuir las magnitudes de las aceleraciones que actúan sobre el cuerpo, la gran esbeltez de los mismos permite que ingresen en el movimiento de rotación, donde son afectados por el alargamiento del periodo de la excitación, alcanzando el volcamiento. Por otro lado, los cuerpos de menores esbelteces (2, 3 y 4), fueron para los cuales este tipo de dispositivo de protección resultó ser más beneficioso, ya que son aquellos cuerpos los que necesitan mayores magnitudes de aceleraciones para iniciar la etapa de rotación, y la inclusión de grandes periodos de aislación (3.5 (s) y 4 (s)), permitió disminuir las magnitudes de las aceleraciones, bajo los niveles de inicio de rotación.

Se debe resaltar que los periodos característicos del acelerograma de Concepción resultan perjudiciales en el movimiento de rotación de cuerpos rígidos, ya que su contenido de frecuencia espectral de mayor peso se asocia a periodos que se encuentran alrededor de los 1 (s) y 2 (s), es decir, son periodos largos. Ya se mencionó que los cuerpos responden de peor forma frente a las excitaciones de periodo largo, alcanzando mayores ángulos de rotación y también volcamiento para menores magnitudes de aceleraciones que al ser excitados por periodos de menor duración. Sin embargo, a diferencia de los registros históricos, los resultados para los cuerpos rígidos montados sobre el aislador fueron muy alentadores cuando fueron excitados por el registro de aceleraciones de Concepción. Cuando se utilizó un periodo de aislación de 4(s), todos los cuerpos mostraron un comportamiento estable, ya que sólo el cuerpo de dimensiones de 7 m de alto y 1 m de ancho sale del reposo y alcanza la etapa de rotación para una intensidad del registro de 2.5. Esto se debe a que el periodo de aislación de 4 (s) reduce las aceleraciones que actúan sobre el cuerpo rígido, hasta 0.145g. Es por esta razón que los cuerpos de esbelteces menores a 7 permanecen en reposo, ya que necesitan mayores magnitudes de aceleración para iniciar la rotación (0.16g para esbeltez de 6), a diferencia de lo ocurrido en los registros históricos como El Centro o Chi-Chi en que el periodo de aislación de 4 (s), no logró una reducción en las magnitudes de las aceleraciones, para impedir el inicio de la rotación. Esto se debe a lo complejo y diverso de los registros, ya que cuando el cuerpo se mueve en etapa de contacto total con el aislador el sistema se transforma en un sistema de un grado de libertad, hasta que

el cuerpo inicia la rotación sobre el aislador. Por lo tanto la máxima aceleración que alcanza el sistema es una variable compleja de predecir. Esto hace pensar, que implementar un sistema de aislación que asegure la estabilidad de un cuerpo rígido en específico requiere estudios más profundos, basándose en la sismicidad de la zona de emplazamiento del cuerpo, ya que la máxima aceleración que se genera no es la única variable que influye en el comportamiento de rotación, debido a que los periodos de las excitaciones juega un rol fundamental. A la luz de los resultados obtenidos en el presente estudio, el autor considera que la mejor forma de proteger elementos considerados como cuerpos rígidos utilizando sistemas de aislamiento pasivo, es impedir que estos ingresen en el movimiento de rotación. Es decir, mantener las magnitudes de aceleraciones bajo el nivel de inicio de rotación para un cuerpo específico, es por esta razón que este tópico se propone para una investigación futura.

Basados en los resultados obtenidos en la presente tesis, se propone llevar a cabo una investigación enfocada en mantener al cuerpo rígido en reposo, es decir que no inicie el movimiento de rotación sobre el aislador, implica obtener los parámetros adecuados de aislación para el cuerpo que se quiere proteger en una zona determinada. Llevar a cabo los estudios basándose en los principios de un análisis de respuesta en el tiempo. Esto quiere decir, obtener un set de registros que representen la zona, basados en ellos obtener una aceleración esperada o de diseño. El análisis debería enfocarse en el proceso del escalamiento de los registros, ya que a diferencia del análisis de respuesta en el tiempo que se hace para estructuras, los cuerpos rígidos no poseen un periodo fundamental de vibración al cual escalar los registros. Con los registros escalados realizar los análisis, basados en 3 registros para usar la máxima aceleración obtenida como la de diseño o bien usar un set de 7 registros y utilizar la aceleración máxima promedio como la aceleración de diseño, siempre intentando relacionar los análisis con los códigos locales o internacionales para diseño sismoresistente.

## REFERENCIAS

- [1] Housner GW. (2007). "The behavior of inverted pendulum structure during earthquake". Bulletin of the Seismological Society of America. 53(2), 404-417.
- [2] Contento A, Di Egidio A. (2009). " Investigations into benefits of base isolation for non-symmetric rigid blocks". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 38, 849-866.
- [3] Zhang J, Makris N. (2001). "Rocking response of free standing blocks under cycloidal pulses". Journal of Engineering Mechanics. ASCE. 127 (5), 473-483.
- [4] Calio I, Marletta M. (2003). " Passive control of the seismic response of art objects". Engineering Structural. 25, 1009-1018.
- [5] Boroschek R, Iruretagoyena A. (2006). "Controlled overturning of the unanchored rigid bodies". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 35, 695-711.
- [6] Ishiyama Y. (1982). "Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 10, 635-652.
- [7] Shenton III H. (1996). "Criteria for initiation of slide, rock and slide-rock, rigid modes". Journal of Engineering Mechanics. 122 (7), 690-693.
- [8] Yim C-S, Chopra AK and Penzien J. (1980). "Rocking response of rigid blocks to earthquake". Earthquake Engineering Structural.8 (6), 565-587.
- [9] Vassiliou M, Makris N. (2012). "Analysis of the rocking response of rigid blocks standing free on a seismically isolated base". Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 41, 177-196.
- [10] Roussis P, Poglou E and Pisiara E. (2008). "Base isolation technology for earthquake protection of art objects". The 14<sup>th</sup> World Conference Earthquake, Beijing, China.
- [11] Apostolou M, Gazetas G and Garini E. (2007). "Seismic response of slender rigid structure whit foundation uplifting". Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 27, 642-654.
- [12] Schau H, Johannes M. (2013). "Rocking and sliding of unanchored bodies subjected to seismic load according to conventional rules". 4<sup>th</sup> ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering.
- [13] Zenteno M. (2007). "Aplicación del analisis dimensional en el balanceo y volteo de cuerpos rígidos ante movimientos del tipo armónico y sismos". Tesis UNAM
- [14] Calio I, Marletta M. (2004). "On the mitigation of the seismic risk of art objects".13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.

# **ANEXO**

## A. Determinación de las Frecuencias Predominantes Mediante la Transformada Rápida de Fourier

En el presente anexo se muestran los resultados obtenidos al llevar los registros de aceleraciones en el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, mediante la transformada rápida de Fourier.

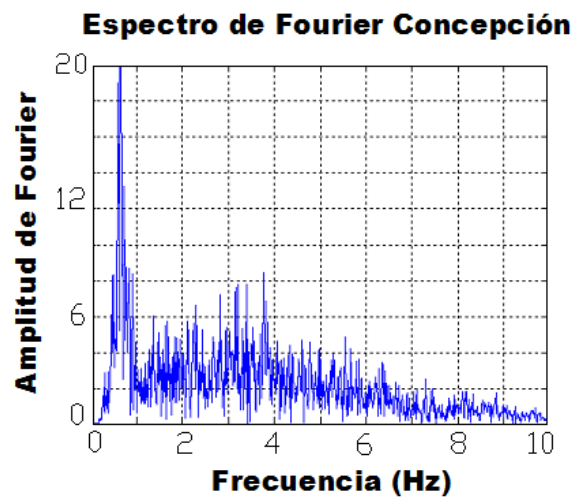


Figura A.1. En el registro de Concepción se muestra como la frecuencia predominante es 0.5-0.8 Hz aproximadamente.

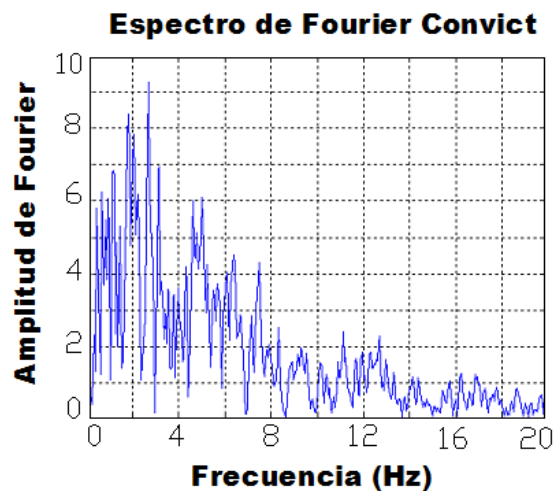


Figura A.2. En el registro de Convict Creek se muestra como la frecuencia predominante es 1.35-3.5 Hz aproximadamente.

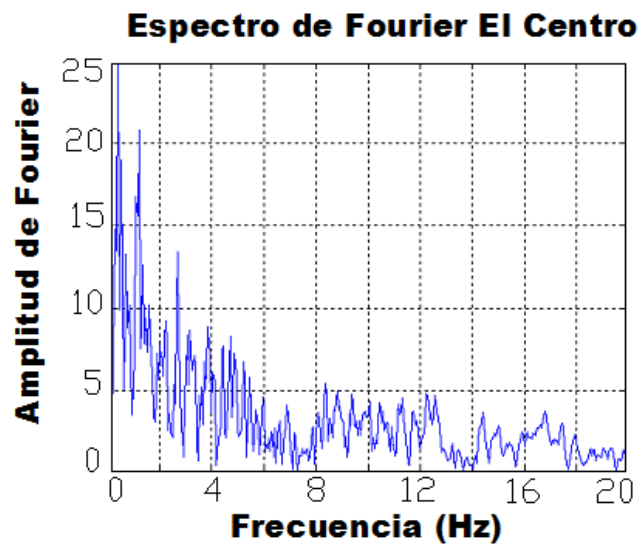


Figura A.3. En el registro de El Centro Imperial Valley se muestra como la frecuencia predominante es 0.5-1 Hz aproximadamente.

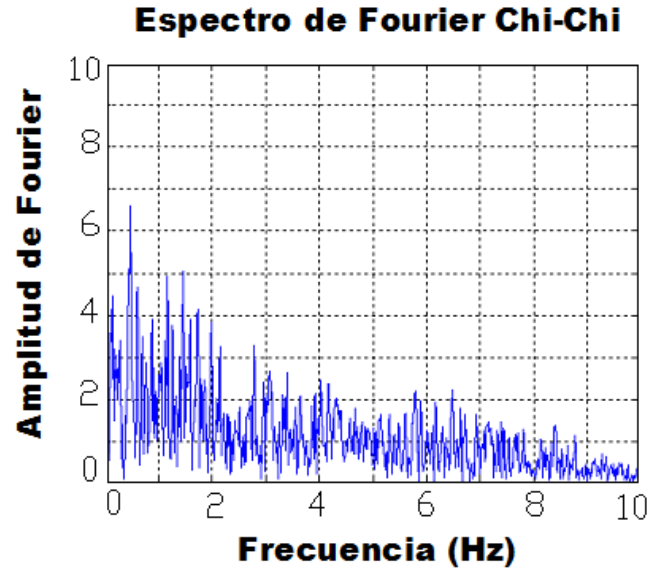


Figura A.4. En el registro de Chi-Chi Se muestra como la frecuencia predominante es 0.5-1.5 Hz aproximadamente.

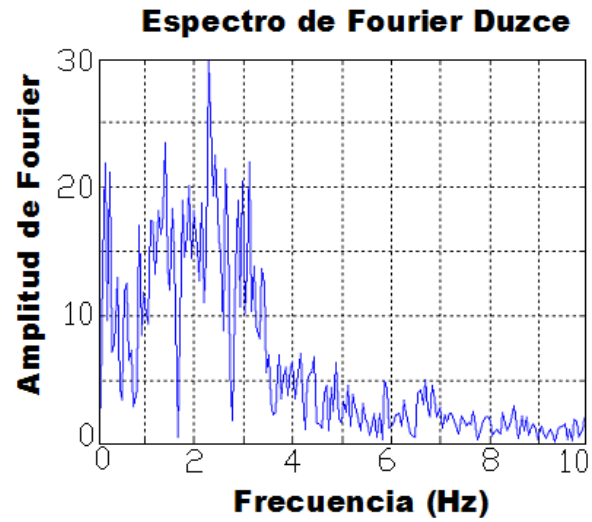


Figura A.5. En el registro de Duzce se muestra como la frecuencia predominante es 1.3-2.5 Hz aproximadamente.

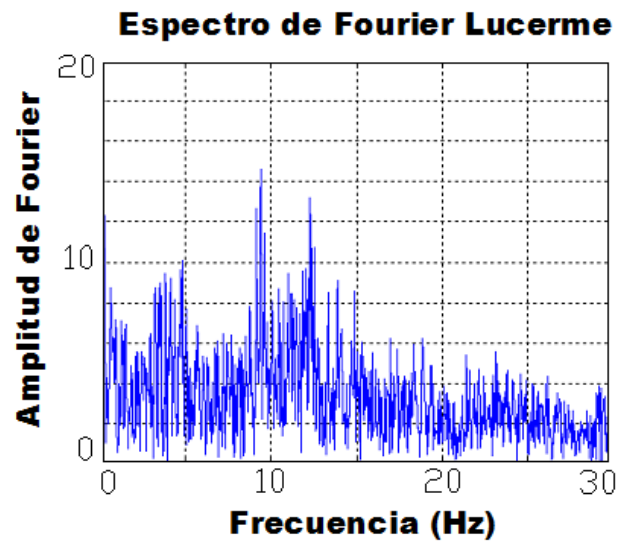


Figura A.6. En el registro de Lucerne Landers se muestra como la frecuencia predominante es 8-12 Hz aproximadamente.

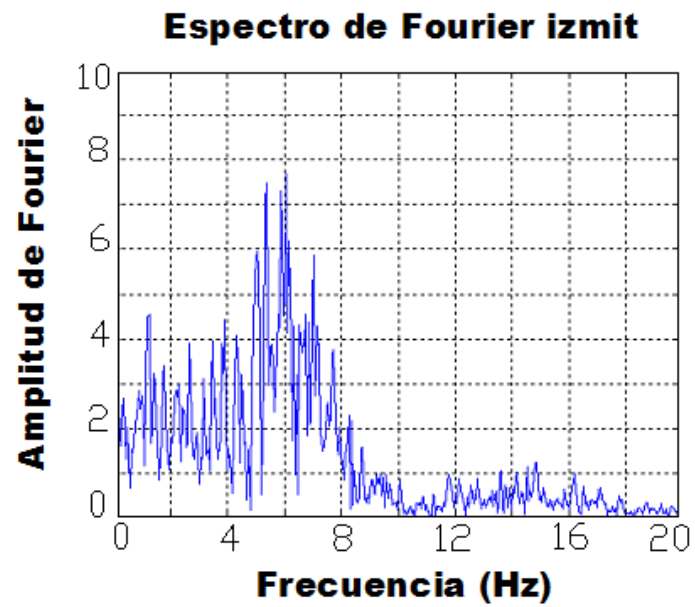


Figura A.7. En el registro de Izmit Kocaeli se muestra como la frecuencia predominante es 5-7 Hz aproximadamente.

## **B. Comportamientos Adquiridos por los Cuerpos Rígidos al Ser Sometidos a los Registros de Sismos Históricos**

En el presente anexo se muestran los comportamientos adquiridos por los cuerpos analizados en el transcurso del Capítulo 4, donde se sometieron a cuerpos rígidos con esbelteces entre 2 y 7 y con distintos tamaños a los acelerogramas de sismos históricos, como se comentó anteriormente las tablas mostradas en el Capítulo 4 fueron reducidas para presentar un análisis más compacto en dicho capítulo. Sin embargo en el presente anexo se muestran los resultados en tablas más extendidas, se debe aclarar que no se realizan comentarios sobre los comportamientos adquiridos por los cuerpos rígidos como se realizó anteriormente.

Tabla B.1. El Centro Imperial Valley, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA=1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
2x1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.5x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.2. El Centro Imperial Valley, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	i=1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	4x2	4x2	3x1	3x1	3x1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	2x1	2x1	1.5x0.5	1.5x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	1x0.5	1x0.5	0.9x0.3	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	0.5x0.25	0.2x0.1	0.6x0.2	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	0.2x0.1	SR	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.3. El Centro Imperial Valley. Cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros).

h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	4x1	4x1	4x1	5x1	5x1	5x1	6x1	6x1	6x1	7x1	7x1	7x1
SR	SR	SR	2x0.5	2x0.5	2x0.5	2.5x0.5	2.5x0.5	2.5x0.5	3x0.5	3x0.5	3x0.5	3.5x0.5	3.5x0.5	3.5x0.5
SR	SR	SR	1x0.25	1x0.25	1x0.25	1x0.2	1x0.2	1x0.2	1.5x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25	0.7x0.1	0.7x0.1	0.7x0.1
SR	SR	SR	0.4x0.1	0.4x0.1	0.4x0.1	0.5x0.1	0.5x0.1	0.5x0.1	0.6x0.1	0.6x0.1	0.6x0.1	SR	SR	SR

Tabla B.4. Convict Creek, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	4x2	4x2	3x1	3x1	3x1	4x1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
2x1	2x1	2x1	1.5x0.5	1.5x0.5	1.5x0.5	2x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	1x0.5	1x0.5	0.9x0.3	0.9x0.3	0.9x0.3	1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.5x0.25	0.5x0.25	0.5x0.25	0.6x0.2	0.6x0.2	0.6x0.2	0.4x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	0.2x0.1	0.2x0.1	0.3x0.1	0.3x0.1	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.5. Convict Creek, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros).

h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	3x1	SR	4x1	4x1	5x1	5x1	5x1	6x1	6x1	6x1	7x1	7x1	7x1
SR	SR	1.5x0.5	SR	2x0.5	2x0.5	2.5x0.25	2.5x0.25	2.5x0.25	3x0.5	3x0.5	3x0.5	3.5x0.5	3.5x0.5	SR
SR	SR	0.9x0.3	SR	1x0.25	1x0.25	1x0.2	1x0.2	SR	1.5x0.25	SR	SR	SR	SR	SR
SR	SR	0.6x0.2	SR	0.4x0.1	SR	0.5x0.1	SR	SR	0.6x0.1	SR	SR	SR	SR	SR
SR	SR	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.6. Convict Creek, Cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros).

h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	0.5x0.1	1x0.2	SR	1.5x0.25	1.5x0.25	0.7x0.1	0.7x0.1	3.5x0.5
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	0.5x0.1	SR	0.6x0.1	0.6x0.1	SR	SR	0.7x0.1

Tabla B.7. Duzce, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
2x1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.5x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.8. Duzce, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	4x2	4x2	3x1	3x1	3x1	4x1	4x1	SR	5x1	5x1	SR	6x1	SR	SR	7x1	SR	SR
SR	2x1	2x1	1.5x0.5	1.5x0.5	1.5x0.5	2x0.5	SR	SR	2.5x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	1x0.5	1x0.5	0.9x0.3	0.9x0.3	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	0.5x0.25	SR	0.6x0.2	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	0.2x0.1	SR	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.9. Duzce, cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7	
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =2
SR	SR	0.5x0.25	SR	0.6x0.2	0.9x0.3	1x0.25	2x0.5	4x1	1x0.2	2.5x0.5	5x1	3x0.5	6x1	6x1	3.5x0.5	7x1
SR	SR	0.2x0.1	SR	0.3x0.1	0.6x0.2	0.4x0.1	1x0.25	2x0.5	0.5x0.1	1x0.2	2.5x0.5	1.5x0.25	3x0.5	3x0.5	SR	3.5x0.5
SR	SR	SR	SR	SR	0.3x0.1	SR	0.4x0.1	1x0.25	SR	0.5x0.1	1x0.2	0.6x0.1	1.5x0.25	1.5x0.25	SR	0.7x0.1
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	SR	0.5x0.1	SR	0.6x0.1	0.6x0.1	SR	SR



Tabla B.13. Izmit, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	4x2	4x2	3x1	3x1	SR	4x1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
2x1	2x1	2x1	1.5x0.5	1.5x0.5	SR	2x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	1x0.5	1x0.5	0.9x0.3	0.9x0.3	SR	1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.5x0.25	0.5x0.25	0.5x0.25	0.6x0.2	0.6x0.2	SR	0.4x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	0.2x0.1	0.2x0.1	0.3x0.1	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.14. Izmit, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	SR	3x1	SR	4x1	4x1	5x1	5x1	5x1	6x1	6x1	6x1	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	SR	1.5x0.5	SR	2x0.5	2x0.5	2.5x0.5	2.5x0.5	2.5x0.5	3x0.5	3x0.5	3x0.5	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	SR	0.9x0.3	SR	1x0.25	1x0.25	1x0.2	1x0.2	1x0.2	1.5x0.25	1.5x0.25	1.5x0.25	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	SR	0.6x0.2	SR	0.4x0.1	0.4x0.1	0.5x0.1	0.5x0.1	SR	0.6x0.1	SR	SR	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	SR	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.15. Izmit, cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	0.5x0.1	SR	0.6x0.1	0.6x0.1	7x1	7x1	7x1
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	3.5x0.5	3.5x0.5	3.5x0.5
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	0.7x0.1	0.7x0.1	0.7x0.1

Tabla B.16. Chi-Chi, cuerpos que experimentan reposo (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
4x2	4x2	4x2	3x1	SR	SR	4x1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
2x1	2x1	2x1	1.5x0.5	SR	SR	2x0.5	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
1x0.5	1x0.5	1x0.5	0.9x0.3	SR	SR	1x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.5x0.25	0.5x0.25	0.5x0.25	0.6x0.2	SR	SR	0.4x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
0.2x0.1	0.2x0.1	0.2x0.1	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.17. Chi-Chi, cuerpos que experimentan rotación (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	3x1	3x1	SR	4x1	SR	5x1	5x1	SR	6x1	6x1	SR	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	1.5x0.5	1.5x0.5	SR	2x0.5	SR	2.5x0.25	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	0.9x0.3	0.9x0.3	SR	1x0.25	SR	1x0.2	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	0.6x0.2	0.6x0.2	SR	0.4x0.1	SR	0.5x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR
SR	SR	SR	SR	0.3x0.1	0.3x0.1	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR

Tabla B.18. Chi-Chi, cuerpos que experimentan volcamiento (dimensiones en metros).

h/b=2			h/b=3			h/b=4			h/b=5			h/b=6			h/b=7		
FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2	FA =1	FA =1.5	FA =2
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	4x2	SR	5x1	2.5x0.5	3x0.5	3x0.5	0.6x0.1	7x1	7x1	7x1
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	2x1	SR	2.5x0.5	1x0.2	1.5x0.25	1.5x0.25	3x0.5	3.5x0.5	3.5x0.5	3.5x0.5
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	1x0.25	SR	1x0.2	0.5x0.1	0.6x0.1	0.6x0.1	1.5x0.25	0.7x0.1	0.7x0.1	0.7x0.1
SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	SR	0.4x0.1	SR	0.5x0.1	SR	SR	SR	0.6x0.1	SR	SR	SR