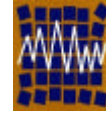




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

CÓDIGO N° A-12-22 CONTROL DEL VUELCO DE OBJETOS NO ANCLADOS BAJO EXCITACIONES SÍSMICAS

A.R. Iruretagoyena¹ y R.L. Boroschek²

1.- Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile.

Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

e-mail: agovena@gmail.com

2.- Departamento de Ingeniería Civil Universidad de Chile.

Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile

e-mail: rborosch@ing.uchile.cl

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es presentar una recomendación de diseño para la superficie de apoyo de objetos rígidos no anclados, capaz de controlar la dirección de vuelco de éstos ante un evento sísmico, de modo de proteger la integridad física del objeto y de las personas. Para lograr esto se aplica una inclinación a la superficie de apoyo de los cuerpos, estudiando la correlación entre el ángulo y el sentido de vuelco de los mismos. El estudio se lleva a cabo mediante un desarrollo analítico donde se estudia el comportamiento dinámico de doce cuerpos distintos, sometidos a varios registros sísmicos de diferentes partes del mundo. Los resultados son validados mediante un estudio experimental, realizado sobre una mesa vibradora, de donde se deduce que el método analítico puede ser utilizado para describir el comportamiento dinámico de un cuerpo rígido sobre un plano inclinado, con un grado de certeza adecuado. Finalmente cumpliendo con el objetivo, se obtiene una expresión analítica para determinar el porcentaje de éxito de vuelco de un cuerpo en un sentido deseado para una inclinación dada, mediante la cual es posible diseñar fundaciones, apoyos o mobiliarios capaces de controlar el sentido de vuelco.

Palabras Clave: rocking, vuelco, no estructura, cuerpo rígido, equipamiento, no anclado

1. INTRODUCCIÓN

Cualquier cuerpo esbelto no anclado tiene una probabilidad de volcar frente a una acción sísmica en su base. El vuelco de estos cuerpos puede ocasionar daños a personas de forma directa o indirecta, así como pérdidas materiales. De aquí nace la importancia de desarrollar algún sistema capaz de controlar el vuelco de éstos cuerpos. En el presente trabajo se propone utilizar un sistema que si bien no evita que los cuerpos vuelquen del todo, controla la dirección que toma el vuelco al incorporar una inclinación a la superficie horizontal de apoyo. Esto permitiría inducir que los cuerpos vuelquen hacia una zona segura, en donde su efecto sea controlado.

1.1. Marco Histórico

Según una investigación histórica realizada por Ishiyama (1980), el estudio del comportamiento dinámico de un cuerpo rígido montado sobre una superficie vibratoria se inició con los trabajos de Milne y Perry en 1881, para aceleraciones horizontales y en 1924 con Mononobe, introduciendo la componente vertical. Una de las obras más reconocidas dado su aporte a la ingeniería sísmica, corresponde a Housner (1963). En su trabajo establece criterios de vuelco para cuerpos esbeltos sometidos a aceleraciones horizontales, intentando explicar el comportamiento observado en copas de aguas para el terremoto de Chile en 1960. Entre sus resultados plantea una ecuación que determina el valor del espectro de velocidad necesario para obtener una probabilidad de vuelco de un 50%.

Yim et al (1980) investigaron la respuesta de rocking para un cuerpo rígido no anclado sin deslizamiento mediante una ecuación específica para describir el movimiento, utilizando aceleraciones sísmicas horizontales y verticales. De esta manera determinaron el efecto que tienen las propiedades del registro sobre el comportamiento del cuerpo. Concluyen que el estado de rocking de un cuerpo es muy sensible a las dimensiones del cuerpo, como lo es su tamaño y esbeltez, así como de las propiedades del registro de entrada.

Ishiyama (1982), describe el comportamiento dinámico de un cuerpo en 6 diferentes estados: reposo, deslizamiento, salto, giro, giro con deslizamiento e impacto. Establece las ecuaciones de equilibrio dinámico para cada estado, así como las condiciones de transición entre estados. Shenton (1995) presenta un desarrollo en el estudio de la transición entre estados dinámicos. En trabajos posteriores Uematsu et al (2000) revisa los criterios de vuelcos establecidos mediante un estudio analítico y experimental, sugiriendo factores a considerar para mejorar la similitud entre las respuestas.

Trabajos más recientes de Fierro et al (2004), Kaneko et al (2004) y Boroschek et al (2004) son dirigidos a establecer criterios de diseño, para resolver el vuelco de cuerpos no anclados sobre superficies horizontales debido a acciones sísmicas. En el caso de Fierro et al (2004), se señalan los efectos que tienen las dimensiones geométricas del cuerpo sobre la probabilidad de vuelco, para un registro particular. Boroschek et al (2004) incorpora el efecto debido a la asimetría del centro de masa de los cuerpos, indicando las modificaciones sobre los criterios de vuelco establecidas por Ishiyama (1982). Por otro lado Kaneko et al (2004) determina que la probabilidad de vuelco tiene una curva de distribución logarítmica normal, la cual se genera de acuerdo a las propiedades geométricas del cuerpo, así como las propiedades del registro de entrada.

Cabe destacar que todos los trabajos hasta ahora mencionados, sólo estudian el comportamiento para cuerpos sobre superficies horizontales. Un trabajo que incorpora superficies inclinadas corresponde al de Plaut et al (1996). Este trabajo se centra en describir el comportamiento fractal que caracteriza el vuelco de un cuerpo rígido en estado de rocking, identificando su comportamiento caótico.

1.2. Teoría

El planteamiento de equilibrio de un cuerpo rígido sobre una superficie inclinada, figura 1.1, permite determinar la aceleración horizontal mínima requerida para iniciar una rotación de un cuerpo, en función de sus dimensiones.

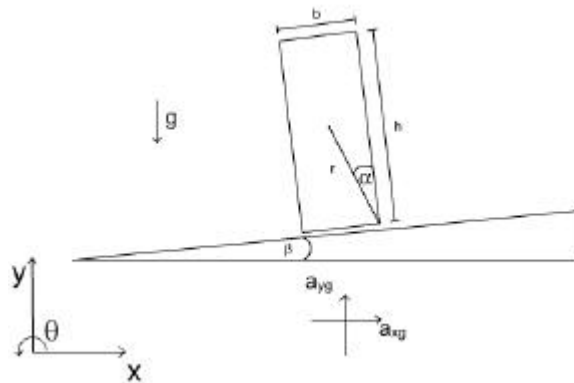


Figura 1.1: Equilibrio Estático

b = base cuerpo

a_{xg} = aceleración basal horizontal

g = aceleración de gravedad

h = altura

a_{yg} = aceleración basal vertical

β = ángulo de inclinación del plano

Realizando un equilibrio de fuerzas estático, la expresión para la aceleración mínima resulta:

$$a_{xg} = \frac{(a_{yg} + g) \cdot \left(\frac{b}{h} - \tan \beta \right)}{\left(1 + \frac{b}{h} \cdot \tan \beta \right)} \quad (1.1)$$

En la figura 1.2 es posible observar los valores que toma la aceleración para distintas inclinaciones del plano, para tres cuerpos diferentes (c1[b/h=0.2]; c2[b/h=0.25]; c3[b/h=0.3]). Se presentan los valores de la aceleración mínima necesaria para una rotación en contra del sentido de inclinación, " A_{min-} " y para una rotación en el sentido de la inclinación, " A_{min+} ".

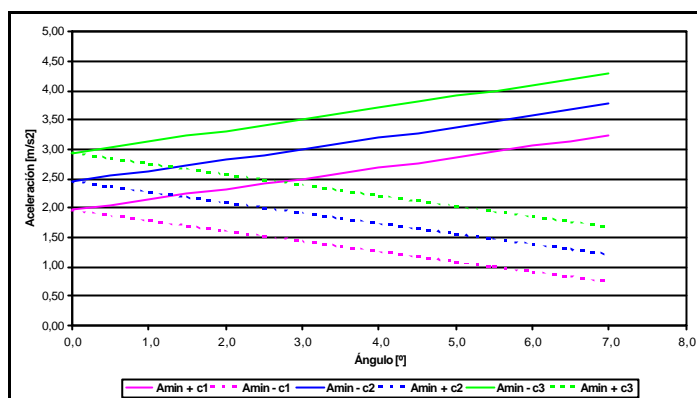


Figura 1.2: Aceleraciones Mínimas

Como se desprende de la figura 1.2 se puede ver que para mayores inclinaciones del plano, se requiere una mayor aceleración para volcar el cuerpo en contra de la pendiente y una menor para el caso contrario. Esto nos señala que es posible controlar el sentido de vuelco de un cuerpo mediante el uso de un plano inclinado, pero hay que tener en consideración que por otro lado se va a aumentar la probabilidad de ocurrencia de vuelco del cuerpo.

2. CONTROL DE ROCKING

Para determinar analíticamente el comportamiento dinámico de un cuerpo rígido no anclado sobre una superficie inclinada, se utilizan dos métodos independientes. El primer caso corresponde a la solución de la ecuación específica de rocking y el segundo corresponde a la solución de la ecuación general para los diferentes estados dinámicos del cuerpo.

2.1. Ecuación Específica Rocking

La ecuación específica de rocking para un cuerpo que no salta ni desliza sobre una superficie horizontal utilizada por Yim et al (1980), puede ser modificada de manera de ampliar su aplicación a superficies inclinadas, resultando:

$$\ddot{\mathbf{q}} = -p^2 \left[\sin(\mathbf{a} \cdot \text{sign}(\mathbf{q}) - \mathbf{q} + \mathbf{b}) \cdot \left(1 + \frac{a_{yg}}{g} \right) + \frac{a_{xg}}{g} \cdot \cos(\mathbf{a} \cdot \text{sign}(\mathbf{q}) - \mathbf{q} + \mathbf{b}) \right] \quad (2.1)$$

donde,

$$p = \sqrt{\frac{3 \cdot g}{4 \cdot r}} \quad \mathbf{a} = \tan^{-1} \left(\frac{b}{h} \right) \quad r^2 = \frac{b^2 + h^2}{4}$$

2.2. Ecuación Generalizada

Como un segundo método de solución se plantea la solución de las ecuaciones específicas de los diferentes estados dinámicos de un cuerpo sometido a una acción sísmica, presentadas por Ishiyama

(1982), los cuales son: Reposo, Deslizamiento Puro, Rotación Pura, Salto, Rotación con Deslizamiento e Impacto.

Para aplicar dichas ecuaciones a este problema fue necesario modificar los parámetros e incluir el efecto de la inclinación del plano. Luego de esto las ecuaciones resultantes quedan de la siguiente manera:

a) *Reposo*

$$\boxed{R_y = (a_{yg} + g) \cdot \cos \mathbf{b} + a_{xg} \cdot \sin \mathbf{b} > 0} \quad (2.2)$$

$$\boxed{R_x = a_{xg} \cdot \cos \mathbf{b} + (a_{yg} + g) \cdot \sin \mathbf{b}} \quad (2.3)$$

Donde R_y y R_x , son las reacciones del cuerpo con el suelo.

b) *Deslizamiento Puro*

$$\boxed{\ddot{x}_r = -(a_{yg} + g) \cdot (\text{sign}(\dot{x}_r) \cdot \cos \mathbf{b} \cdot \mathbf{m}_k + \sin \mathbf{b}) - a_{xg} \cdot (\cos \mathbf{b} + \text{sign}(\dot{x}_r) \cdot \sin \mathbf{b} \cdot \mathbf{m}_k)} \quad (2.4)$$

Donde se define x_r, y_r, \mathbf{q}_r como el sistema de coordenadas relativas al plano; y \mathbf{m}_k como el coeficiente de roce cinético entre el plano y el cuerpo.

c) *Rotación Pura*

$$\boxed{\ddot{\mathbf{q}}_r = \frac{r}{i_g^2 + r^2} \begin{bmatrix} \cos(\mathbf{a} - |\mathbf{q}_r|) \cdot [(a_{yg} + g) \cdot \sin \mathbf{b} + a_{xg} \cdot \cos \mathbf{b}] - \\ s_l \cdot \sin(\mathbf{a} - |\mathbf{q}_r|) \cdot [(a_{yg} + g) \cdot \cos \mathbf{b} + a_{xg} \cdot \sin \mathbf{b}] \end{bmatrix}} \quad (2.5)$$

$$s_l = \text{sign}(\mathbf{q}_r) \quad \mathbf{q}_r \neq 0$$

$$s_l = \text{sign}(\dot{\mathbf{q}}_r) \quad \mathbf{q}_r = 0 \wedge \dot{\mathbf{q}}_r \neq 0$$

$$s_l = \text{sign}[a_{xg} \cdot \cos \mathbf{b} + (a_{yg} + g) \cdot \sin \mathbf{b}] \quad \mathbf{q}_r = 0 \wedge \dot{\mathbf{q}}_r = 0$$

d) *Salto*

$$\boxed{\ddot{x}_r = -a_{xg} \cdot \cos \mathbf{b} - (a_{yg} + g) \cdot \sin \mathbf{b}} \quad (2.6)$$

$$\boxed{\ddot{y}_r = -(a_{yg} + g) \cdot \cos \mathbf{b} - a_{xg} \cdot \sin \mathbf{b}} \quad (2.7)$$

e) *Rotación con Deslizamiento*

$$\boxed{\ddot{\mathbf{q}}_r = \frac{s'' \cdot r \cdot [r \cdot c \cdot \dot{\mathbf{q}}_r^2 - (a_{yg} + g) \cos \mathbf{b} - a_{xg} \sin \mathbf{b}] \cdot [s + s' \cdot s'' \cdot \mathbf{m}_k \cdot c]}{r^2 \cdot s \cdot [s + s' \cdot s'' \cdot \mathbf{m}_k \cdot c] + i_g^2}} \quad (2.8)$$

$$\ddot{x}_r = s' \cdot m_k \cdot [r \cdot \dot{q}_r^2 \cdot c - s'' \cdot r \cdot \ddot{q}_r \cdot s - (a_{yg} + g) \cdot \cos \mathbf{b} - a_{xg} \sin \mathbf{b}] - a_{xg} \cdot \cos \mathbf{b} - (a_{yg} + g) \cdot \sin \mathbf{b} \quad (2.9)$$

con:

$$\begin{aligned} s' &= \text{sign}(\dot{x}_{ro}) && \text{si } \dot{x}_{ro} \neq 0 \\ s' &= \text{sign}(-a_{xg} \cos \mathbf{b} - (a_{yg} + g) \cdot \sin \mathbf{b}) && \text{si } \dot{x}_{ro} = 0 \text{ y } a_{xg} \neq 0 \\ s' &= \text{sign}(-\mathbf{q}_r (\mathbf{a} - |\mathbf{q}_r| - \text{sign}(\mathbf{q}_r) \cdot \mathbf{b})) && \text{si } \dot{x}_{ro} = 0 \text{ y } a_{xg} = 0 \\ s'' &= \text{sign}(\dot{\mathbf{q}}_r) && \text{si } \mathbf{q}_r \neq 0 \\ s'' &= \text{sign}(\ddot{\mathbf{q}}_r) && \text{si } \mathbf{q}_r = 0 \text{ y } \dot{\mathbf{q}}_r \neq 0 \\ s'' &= \text{sign}(a_{xg} \cos \mathbf{b} + (a_{yg} + g) \cdot \sin \mathbf{b}) && \text{si } \mathbf{q}_r = 0 \text{ y } \dot{\mathbf{q}}_r = 0 \\ c &= \cos(\mathbf{a} - |\mathbf{q}_r|) \\ s &= \sin(\mathbf{a} - |\mathbf{q}_r|) \end{aligned}$$

3. ESTUDIO ANALÍTICO

Se estudia la respuesta de 12 cuerpos de diferentes dimensiones, como se muestra en la tabla 3.1. Todos los cuales son sometidos a una base de registros sísmicos obtenidos de los terremotos Taiwan 1999, Kern County 1952, Northridge 1994, Chile 1985, Kobe 1995, Kocaeli 1999, Landers 1992, Loma Prieta 1989, Imperial Valley 1979, Morgan Hill 1984, San Fernando 1971, Borego Mountain 1968, Palm Springs 1986, Sierra Madre 1991, y Whittier 1987, lo que da un total de 314 registros. Estos son ingresados considerando su componente vertical y horizontal, sin modificar amplitud o frecuencia por lo que los resultados son validos para un cuerpo ubicado a nivel de terreno. La componente horizontal es ingresada en ambos sentidos de manera de evitar sesgo en los datos. Cada ensayo se repite para distintos planos de inclinación, partiendo por el plano horizontal y llegando a una inclinación máxima de 7° mediante aumentos de 0,5°. Para cada cuerpo se identifica que cantidad de registros provocaron vuelco, y de éstos que porcentaje fue en la misma dirección de inclinación del plano. Para disminuir los tiempos de ensayo, se ensayaron para cada cuerpo sólo aquellos registros que cumplen con la condición de aceleración mínima (Ec.1.1) para el plano horizontal, dichas cantidades se muestran en la tabla 3.1 en la fila “#Registros”. Los resultados obtenidos para algunos cuerpos para las inclinaciones respectivas, se muestran en las figuras 3.1 a 3.3.

Tabla 3.1: Dimensiones Cuerpos Estudiados

Cuerpo		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Base	[m]	0,04	0,05	0,06	0,10	0,13	0,15	0,18	0,20	0,25	0,30	0,30	0,38
Altura	[m]	0,20	0,20	0,20	0,50	0,50	0,50	0,50	1,00	1,00	1,00	1,50	1,50
b/h	[]	0,20	0,25	0,30	0,20	0,26	0,30	0,36	0,20	0,25	0,30	0,20	0,25
r	[m]	0,10	0,10	0,10	0,25	0,26	0,26	0,27	0,51	0,52	0,52	0,76	0,77
a	[rad]	0,20	0,24	0,29	0,20	0,25	0,29	0,35	0,20	0,24	0,29	0,20	0,25
# Registros	[]	258	196	158	258	188	158	116	258	196	158	258	196

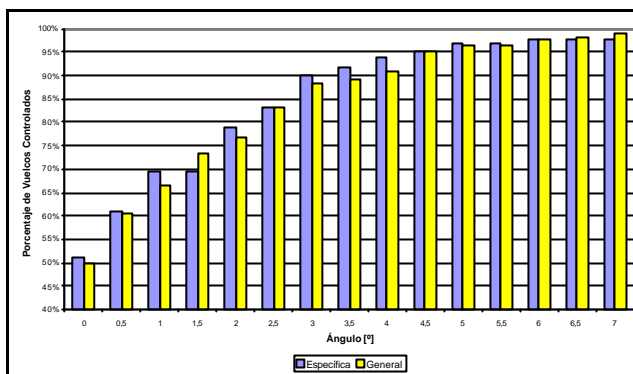


Figura 3.1: Resultados Cuerpo 1 (b:0.04-h:0.2)

Tabla 3.2: Resultados Cuerpo 1 (b:0.04 – h:0.2)

Ángulo	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Sol Espec.	51%	61%	69%	69%	79%	83%	90%	92%	94%	95%	97%	97%	98%	98%	98%
Sol. Gral	50%	60%	67%	73%	77%	83%	89%	89%	91%	95%	96%	96%	98%	98%	99%
# Vuelcos	170	172	175	187	192	205	213	223	228	233	238	243	246	248	251

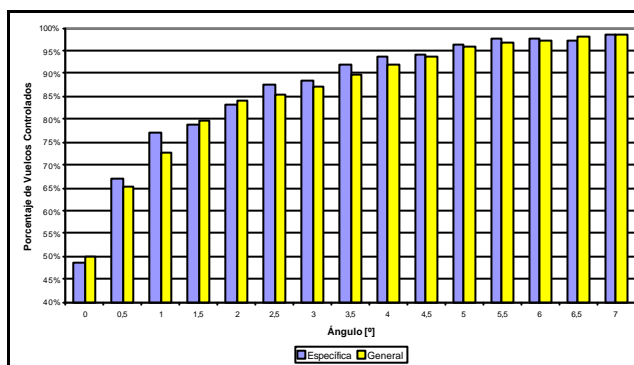


Figura 3.2: Resultados Cuerpo 4 (b:0.10-h:0.5)

Tabla 3.3: Resultados Cuerpo 4 (b:0.10 – h:0.5)

Ángulo	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Sol Espec.	52%	62%	67%	67%	78%	81%	90%	89%	90%	93%	93%	94%	94%	97%	98%
Sol. Gral	50%	67%	63%	75%	78%	79%	85%	89%	92%	92%	94%	93%	93%	95%	97%
# Vuelcos	111	114	119	123	129	133	137	147	154	161	168	172	174	181	184

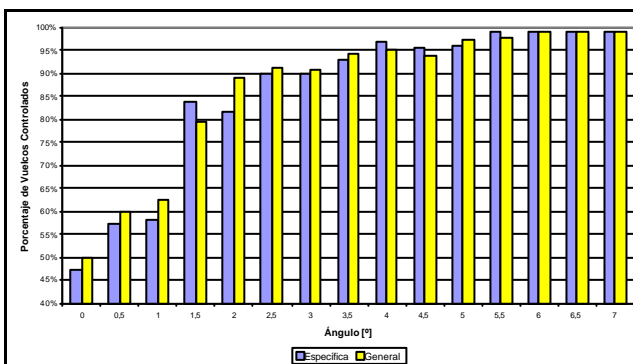


Figura 3.3: Resultados Cuerpo 12 (b:0.38 – h:1.5)

Tabla 3.4: Resultados Cuerpo 12 (b:0.38 – h:1.5)

Ángulo	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7
Sol Espec.	47%	57%	58%	84%	82%	90%	90%	93%	97%	95%	96%	99%	99%	99%	99%
Sol. Gral	50%	60%	63%	80%	89%	91%	91%	94%	95%	94%	97%	98%	99%	99%	99%
# Vuelcos	36	36	36	43	47	50	55	56	64	70	76	85	91	102	112

Es posible apreciar que los valores obtenidos mediante los dos métodos analíticos propuestos, son muy similares. En promedio existe una diferencia menor al 4% para la totalidad de los cuerpos, entre ambos métodos. Dado esto la utilización de uno u otro radica en ventajas independientes de los resultados, como lo son la velocidad de proceso o la facilidad de utilización. En la figura 3.4 se presenta la solución promedio para cada cuerpo.

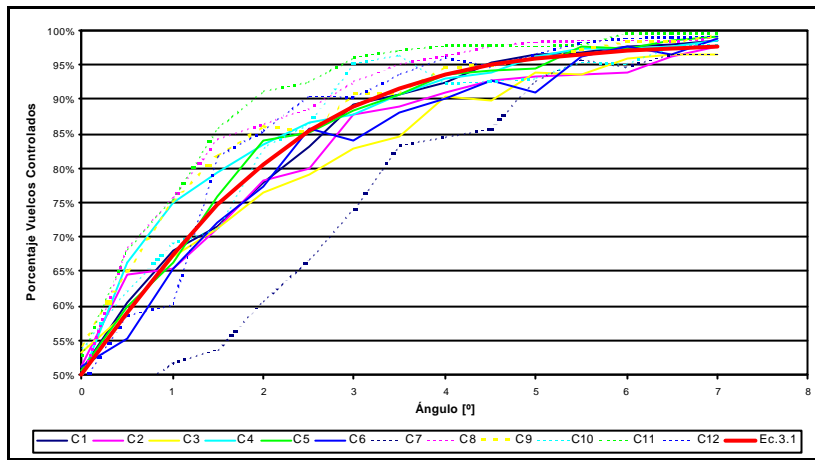


Figura 3.4: Resultados Totales

Es claro ver el comportamiento asintótico de las curvas obtenidas. Dada la similitud del comportamiento observado, se puede caracterizar el comportamiento de vuelco de acuerdo al plano inclinado respectivo, mediante una ecuación promedio. Los parámetros de la ecuación se determinaron a modo de obtener la mayor correlación con los datos y disminuir al mínimo el error porcentual. Esta curva se puede apreciar en la figura 3.4 como Ec.3.1 y sus valores se presentan a continuación.

$$\%VuelcoControlado = \tanh\left(\frac{b}{c1}\right) \cdot c2 + 0.5 \quad (3.1)$$

con $c1=0.048$ $c2=0.48$ $\beta = \text{ángulo plano inclinado [rad]}$

Esta curva corresponde al comportamiento promedio de cualquier cuerpo. Si se comparan los resultados de esta curva con los valores promedios para todos los cuerpos, se observa que tiene una correlación de un 99.8% y un error porcentual de un 1.37 %, donde se define error porcentual como:

$$Error\% = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_f)^2}{\sum X_f^2}} \quad (3.2)$$

La comparación con los resultados, se puede apreciar en la figura 3.5 y la tabla 3.5

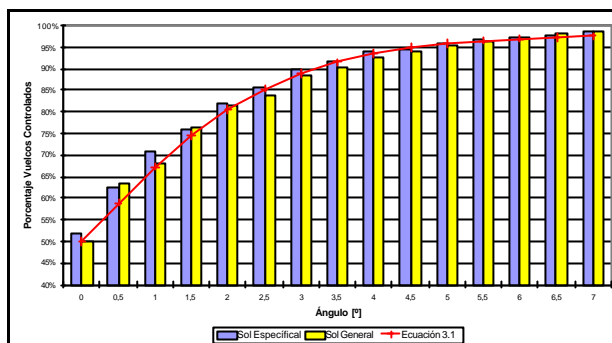


Figura 3.5: Comparación curva de ajuste y valores promedios para todos los cuerpos

Tabla 3.5: Comparación curva de ajuste y valores promedio para todos los cuerpos

% +	Comparación Resultados															
Ángulo	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	error %
Gral	50%	63%	68%	77%	81%	84%	88%	91%	93%	94%	95%	97%	97%	98%	99%	1,67%
Espec	52%	62%	71%	76%	82%	86%	90%	92%	94%	95%	96%	97%	97%	98%	98%	1,74%
Ec 3.1	50%	59%	67%	75%	81%	85%	89%	92%	94%	95%	96%	97%	97%	97%	98%	

De la figura 3.5 se aprecia que la curva propuesta presenta su mayor error para ángulos pequeños, siendo éste un error conservador para el promedio de los cuerpos. Es posible desarrollar un resultado más representativo del comportamiento de cada cuerpo en específico. Para esto es necesario incorporar las propiedades geométricas de los cuerpos en los parámetros de la ecuación promedio (Ec.3.1), obteniendo de esta forma una ecuación característica (Ec.3.3) para calcular el porcentaje de vuelco controlado para un cuerpo con dimensiones conocidas.

$$\%VuelcoControlado = \tanh\left(\frac{b}{c1}\right) \cdot c2 + 0.5 \quad (3.3)$$

con : $c1 = 0.1136 \cdot \frac{b}{h} - 0.0283 \cdot r + 0.0279$ $c2 = 0.48$ $r = \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}$ [m]

β = ángulo plano inclinado b = base del cuerpo [m] h = altura del cuerpo [m]

En las figuras 3.6 a 3.17 se presentan los resultados para cada cuerpo, agregando la curva correspondiente al resultado analítico.

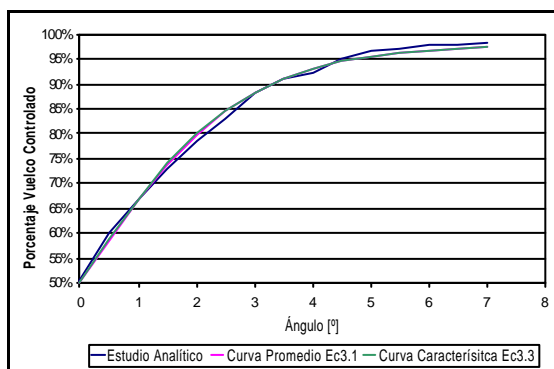


Figura 3.6: Cuerpo 1

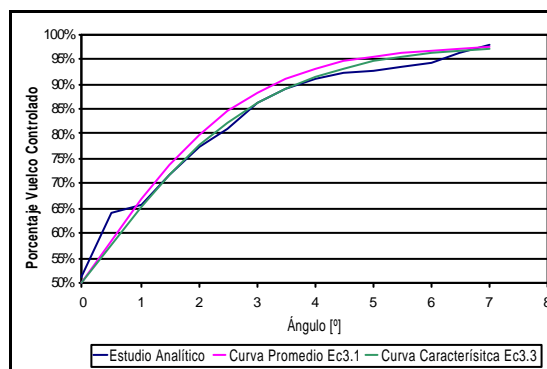


Figura 3.7: Cuerpo 2

Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica
IX Jornadas, 16-19 de Noviembre de 2005, Concepción - Chile

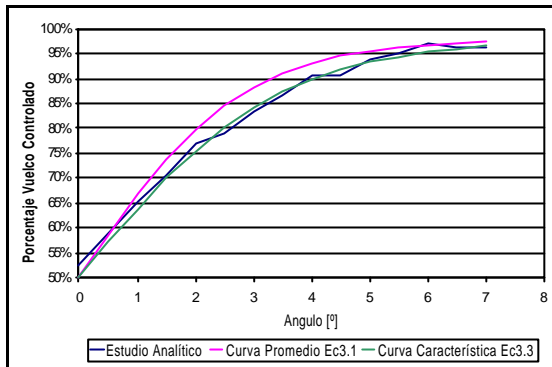


Figura 3.8: Cuerpo 3

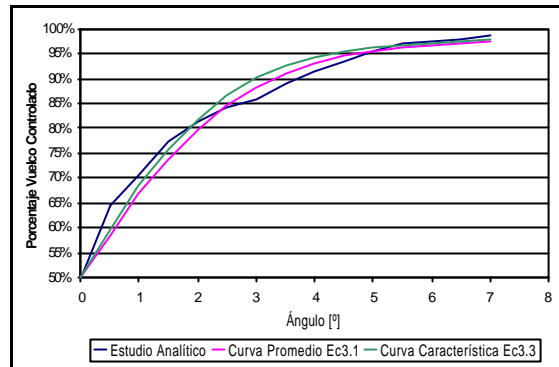


Figura 3.9: Cuerpo 4

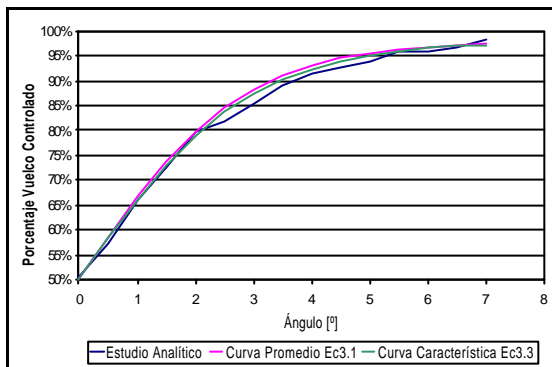


Figura 3.10: Cuerpo 5

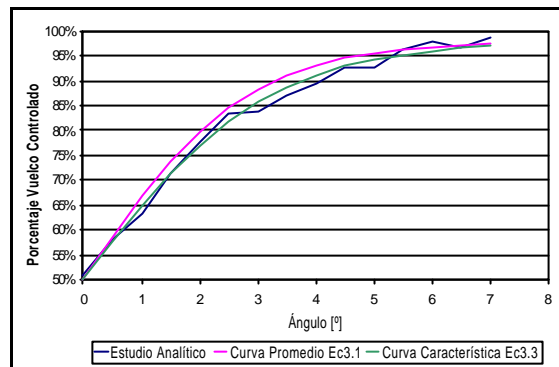


Figura 3.11: Cuerpo 6

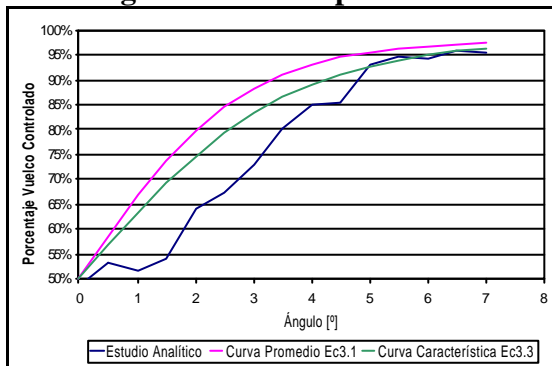


Figura 3.12: Cuerpo 7

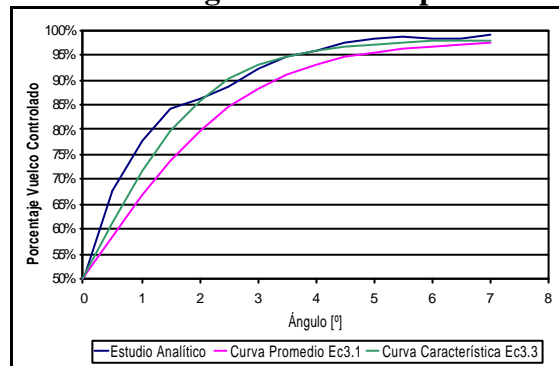


Figura 3.13: Cuerpo 8

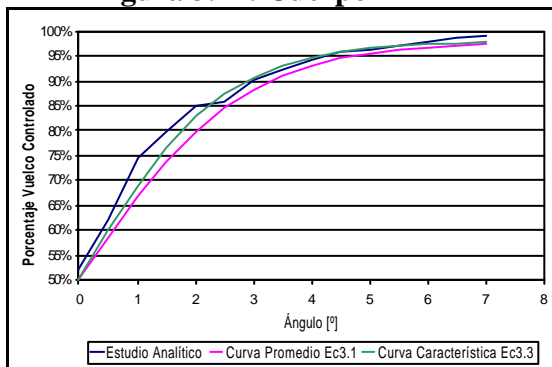


Figura 3.14: Cuerpo 9

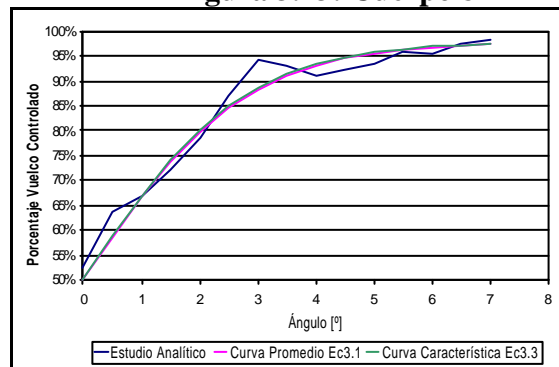


Figura 3.15: Cuerpo 10

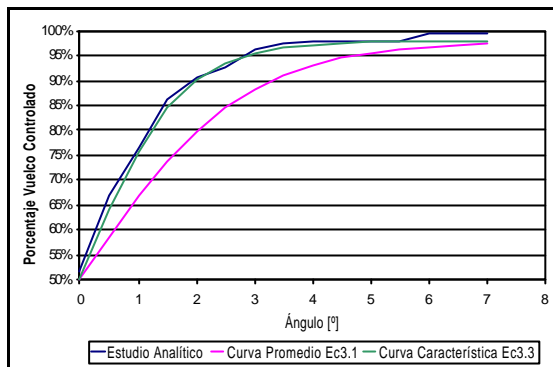


Figura 3.16: Cuerpo 11

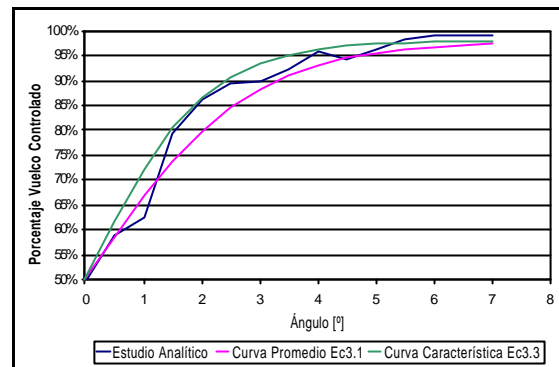


Figura 3.17: Cuerpo 12

En la tabla 3.6, se pueden apreciar algunas variables estimativas del error generado por el uso de una u otra curva, donde CP se refiere a la curva promedio Ec.3.1 y CC a la curva característica Ec.3.3.

Tabla 3.6: Estimadores de Error

Cuerpo	Propiedades Geométricas					Diferencia Maxima		Area Entre Curvas		Error % Ec3.2	
	Base	Altura	b/h	R	a	CP	CC	CP	CC	CP	CC
1	0,04	0,2	0,20	0,10	0,20	3%	-2%	5,01	5,21	1%	1%
2	0,05	0,2	0,25	0,10	0,24	9%	10%	15,57	8,22	3%	2%
3	0,06	0,2	0,30	0,10	0,29	-7%	5%	16,83	5,86	3%	2%
4	0,10	0,5	0,20	0,25	0,20	9%	7%	12,39	13,22	3%	3%
5	0,13	0,5	0,26	0,26	0,25	-5%	-3%	9,23	5,87	2%	1%
6	0,15	0,5	0,30	0,26	0,29	-5%	-2%	13,90	6,65	3%	2%
7	0,18	0,5	0,36	0,27	0,35	-37%	-29%	63,12	40,98	13%	9%
8	0,20	1,0	0,20	0,51	0,20	14%	8%	31,50	11,65	6%	3%
9	0,25	1,0	0,25	0,52	0,24	10%	7%	17,61	9,23	4%	2%
10	0,30	1,0	0,30	0,52	0,29	7%	6%	12,39	12,35	3%	3%
11	0,30	1,5	0,20	0,76	0,20	14%	4%	41,16	6,04	8%	1%
12	0,38	1,5	0,25	0,77	0,25	7%	-16%	15,13	14,91	4%	3%

En general se puede apreciar que los errores entregados por ambas curvas son relativamente pequeños. En la tabla 3.6 se muestran algunos parámetros elegidos para poder calificar ambas curvas, de los cuales es posible observar que aunque la diferencia es pequeña, al utilizar la curva característica se disminuyen las diferencias con los valores analíticos para cada cuerpo, sobre todo para aquellos de mayor tamaño. Por lo tanto, el uso de una u otra curva depende de la aplicación que se le quiera dar. Particularmente se recomienda el uso de la curva promedio para el diseño de apoyos de objetos que puedan tener geometrías variables o desconocidas y la curva característica para el diseño de un apoyo particular para un cuerpo específico de dimensiones conocidas.

Analizando la influencia del tamaño del cuerpo sobre el control de vuelco, es posible observar que en general dado una esbeltez constante los cuerpos más grandes son más fáciles de controlar mientras que los cuerpos más pequeños tienen comportamientos más caóticos y de difícil control. En la figura 3.18 se puede observar las diferentes curvas de porcentaje de vuelco controlado para cuerpos de diferentes tamaños con una esbeltez constante.

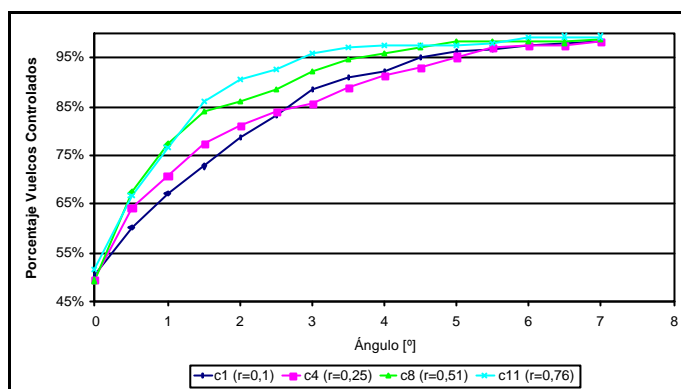


Figura 3.18: Esbeltez Constante ($h/b=5$)

Mientras mayor es el tamaño del cuerpo, se obtiene una mayor probabilidad de vuelco controlado para un mismo ángulo.

4. ENSAYO EXPERIMENTAL

Se estudió experimentalmente el comportamiento de 7 cuerpos, elegidos de la Tabla 3.1. Se tomaron aquellos que tienen una relación b/h que genera casos interesantes de estudio, en los casos de cuerpos con alturas mayores de 1m se optó por no realizarlos debido a problemas de ensayo. En la tabla 4.1 se muestran las dimensiones de los cuerpos ensayados.

Tabla 4.1: Cuerpos Ensayados

Cuerpo	Base	Altura	Relación	Masa	Centro de Gravedad	
	[mm]	[mm]	[]	[kg]	bcg [mm]	hcg [mm]
1	99	493	0,20	5,220	51,5	243
2	130	500	0,26	13,110	65	254
3	152	500	0,30	15,310	76,5	251,5
4	39	200	0,20	0,356	19,5	100
5	49	200	0,25	0,560	25	100
6	200	998	0,20	54,960	100	495
7	248	995	0,25	65,140	124	499

Los cuerpos se confeccionaron con madera aglomerada, creando de esta manera cuerpos sólidos con una distribución de masa relativamente uniforme. Para generar el coeficiente de roce necesario para que no exista deslizamiento, se adhirieron a las superficies de contacto papeles rugosos (lija). Los ángulos a estudiar son el plano horizontal y los planos inclinados entre 4° y 5.5° , éstos últimos son un rango de margen del ángulo encontrado en el desarrollo analítico. Los registros a utilizar son una selección de los 25 registros que presentaron mayores cantidades de vuelco en los ensayos analíticos, del total de los 314 registros utilizados. Lamentablemente mucho de estos registros sobrepasan los límites físicos de reproducción que posee la mesa vibradora. Debido a esto se tuvo que escalar dichos registros de manera de poder reproducirlos. El listado final de registros a utilizar y sus respectivas escalas se muestran en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Registros y Escalas

Registro	Escala
KOBE 1995, KJMA 090 - up	0.68
NORTHRIDGE 1994 , SYLMAR 142 - up	0.57
CHI-CHI 1999 TAIWAN, TCU068 E - UP	0.35
IMPERIAL VALLEY 1979, BONDS CORNER 140 - up;	0.26
IMPERIAL VALLEY 1979, IMPERIAL VALLEY COLLEGE, EL CENTRO ARRAY #7, CA S50W - up;	0.49
NORTHRIDGE 1994, CASTAIC - OLD RIDGE ROUTE 090 - up;	0.96
LOMA PRIETA 1989, CORRALITOS - EUREKA CANYON RD. 000 - up;	0.91
LOMA PRIETA 1989, CORRALITOS - EUREKA CANYON RD. 090 - up;	1
NORTHRIDGE 1994, CASTAIC - OLD RIDGE ROUTE 360 - up;	0.92
CHILE 1985, LLOLLEO 10 - up	0.67
CHILE 1985, MELIPILLA FW - up	1
IMPERIAL VALLEY 1979, JAMES RD., EL CENTRO ARRAY #5, CA S50W - up;	0.53
LANDERS 1992, Lucerne 270 - up	0.58
LOMA PRIETA 1989, GILROY #1 - GAVILAN COLLEGE, WATER TANK 090 - up;	1
WHITTIER 1987, BELL - BULK MAIL FACILITY 280 - up;	1
LOMA PRIETA 1989, GILROY #3 - GILROY SEWAGE PLANT 000 - up;	1
IMPERIAL VALLEY 1979, ANDERSON RD., EL CENTRO ARRAY #4 S40E - up;	1
CHILE 1985, LLAY-LLAY N80W - up;	1
IMPERIAL VALLEY 1979, CRUICKSHANK RD., EL CENTRO ARRAY #8, CA S40E - up;	0.95
KOCAELI 1999 TURKEY, DZC 270	0.93
CHILE 1985, LLAY-LLAY S10W - up;	1
IMPERIAL VALLEY 1979, IMPERIAL VALLEY COLLEGE, EL CENTRO ARRAY #7, CA S40E - up;	1
NORTHRIDGE 1994, ARLETA - NORDHOFF AVE FIRE STATION 090 - up;	0.91
LOMA PRIETA 1989, GILROY #2 - HWY 101/BOLSA RD. MOTEL 000 - up;	1
LOMA PRIETA 1989, GILROY #2 - HWY 101/BOLSA RD. MOTEL 090 - up;	1

Para poder realizar una adecuada comparación entre los resultados analíticos y experimentales, se midieron las aceleraciones y desplazamientos efectivos que generó la mesa para cada registro. Luego utilizando las mismas dimensiones de los cuerpos utilizados en la mesa más los registros medidos sobre la mesa, se realizó un ensayo analítico con dichos valores. Tras comparar las diferentes respuestas, se observa que los resultados obtenidos son muy similares, validando el ensayo analítico. El error porcentual obtenido para la totalidad de los ensayos corresponde a un 4.66%

5. CONCLUSIONES

Se implementaron dos métodos de solución analítica para cuerpos rígidos no anclados sobre una superficie inclinada, observando gran similitud entre ellos. Las diferencias son menores de un 4% entre los resultados. Desde el punto de vista de los resultados, no existe diferenciación entre los métodos, pero sí existen ventajas computacionales entre ellos. La ventaja del método específico de rocking es que la ecuación es relativamente simple por lo que no se requiere de una programación muy compleja para resolverla. Lamentablemente el tiempo de procesamiento resultó excesivo. El segundo método correspondiente a la solución general, resultó de una programación más compleja debido a la gran cantidad de ecuaciones a utilizar y las diferentes condiciones de borde que continuamente se deben verificar. Pero contrarrestando el tiempo empleado para la programación, obtuvo los resultados en un tiempo diez veces menor que el usado por el primer método.

A través del ensayo experimental se pudo validar exitosamente los ensayos analíticos. Además permitió observar de forma real el comportamiento de los cuerpos durante un registro sísmico, identificando el comportamiento caótico que representa un cuerpo en estado de rocking. Se aprecia una gran inestabilidad en el comportamiento de rocking de los cuerpos; no es posible realizar dos ensayos idénticos para todo el período de excitación. Sólo para registros de pulsos grandes, en los cuales el cuerpo vuelca casi de forma

inmediata, es posible asegurar un comportamiento predecible y repetible, pero en el resto sobre todo cuando hay presencia de estados de rocking prolongados, se aprecia un comportamiento caótico. A pesar de esto es posible forzar una dirección de vuelco para todos los cuerpos de forma efectiva.

Mirando el comportamiento global de los cuerpos estudiados, se puede afirmar que el tamaño de los cuerpos tiene influencia sobre el control de vuelco. Se aprecia que dado una esbeltez constante, para cuerpos más grandes es más fácil controlar el sentido de vuelco, mientras que para los más pequeños se aprecia un comportamiento más caótico y difícil de controlar. Dado que los resultados obtenidos son a partir solamente de los casos que generaron vuelcos, la influencia de la geometría de los cuerpos sobre la forma de las curvas se ve aminorada, obteniendo diferencias menores a un 15% en el peor de los casos, para cuerpos con diferentes tamaños.

Es posible determinar que las respuestas observadas tienen una forma particular y predecible, más aun es posible determinar una ecuación que describe su comportamiento. Se plantean dos soluciones, la primera, señalada a continuación, corresponde a una ecuación promedio de menor exactitud pero de fácil aplicación.

$$\%VuelcoControlado = \tanh\left(\frac{b}{c1}\right) \cdot c2 + 0.5$$

con $c1=0.048$ $c2=0.48$ $\beta = \text{ángulo plano inclinado [rad]}$

A través de ésta ecuación se determina el comportamiento promedio de un cuerpo rígido no anclado sobre un plano inclinado, dado que ocurre vuelco. Como se puede apreciar ésta no considera la geometría del cuerpo y por esto mismo es aplicable a cualquier caso general. Por lo mismo se recomienda su uso para diseñar apoyos de objetos que puedan tener geometrías variables. Comparativamente los resultados obtenidos mediante esta ecuación, ofrecen diferencias menores a un 8% con respecto al comportamiento observado a través del estudio analítico.

En la Tabla 5.1 se pueden observar los ángulos y sus respectivos porcentajes de vuelcos obtenidos a través del uso de esta ecuación.

Tabla 5.1 Porcentaje de Vuelcos Controlados e Inclinación de la Superficie de Apoyo

	Probabilidad de Vuelco en Sentido Deseado														
%	50%	59%	67%	75%	81%	85%	89%	92%	94%	95%	96%	97%	97%	97%	98%
Ángulo [°]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7

La segunda solución corresponde a una ecuación característica para cada cuerpo, la cual se adapta a la geometría específica del cuerpo en estudio. Se utiliza la misma expresión anterior pero con:

$$c1 = 0.1136 \cdot \frac{b}{h} - 0.0283 \cdot r + 0.0279$$

con $b = \text{base del cuerpo [m]}$ $h = \text{altura del cuerpo [m]}$ $r = \sqrt{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \left(\frac{h}{2}\right)^2}$ [m]

Si bien los resultados son independientes para cada cuerpo, se obtienen resultados más precisos que con la ecuación promedio, obteniendo una diferencia menor al 3.5% para todos los cuerpos, con respecto al estudio analítico. La aplicación de ésta ecuación se recomienda para diseñar el apoyo para un cuerpo en específico, de manera de controlar su sentido de vuelco.

REFERENCIAS

- Boroshek, R. and Romo, D., (2004), "Overturning Criteria for Non-Anchored Non-Symmetric Rigid Bodies", Paper No.295, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Fierro, E., Perry, C., (2004), "Overturning of Rocking Blocks", Paper No. 1634, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Housner, George, (1963), "The Behavior of Inverted Pendulum Structures During Earthquakes", Bulletin of Seismological Society of America, Vol.53, No.2, 403-407.
- Ishiyama, Y., (1980), "Review and Discussion on Overturning of Bodies by Earthquake Motions", Research Paper No.85, Building Research Institute, Ministry of Construction.
- Ishiyama, Y., (1982), "Motions of Rigid Bodies and Criteria for Overturning by Earthquake Excitations", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.10, 635-650.
- Kaneko, M. and Hayashi, Y., (2004), "A Proposal for Simple Equations to Express a Relation Between Overturning Ratios of Rigid Bodies and Input Excitations", Paper No. 3299, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada.
- Plaut, R.H., Fielder, W.T., Virgin, L.N., (1995), "Fractal Behavior of an Asymmetric Rigid Block Overturning Due to Harmonic Motion of a Tilted Foundation", Chaos, Solitons and Fractals, Vol. 7, No. 2, pp 177-196.
- Romo Muñoz, David Alejandro, (2002), "Estudio Analítico del Comportamiento Dinámico de un Cuerpo Rígido no Anclado", Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- Shenton, H.W., (1995), "Criteria for Initiation of Slide, Rock, and Slide Rock Rigid-Body Modes", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 122, No. 7, 690-693.
- Uematsu T., Miyagi M. and Ishiyama Y., (2000), "Rocking Motion and Criteria for Overturning of Bodies on a Floor – Comparison Between Analysis and Experiment", Paper No.2313, 12th World Conference on Earthquake Engineering.
- Yim, C.S., Chopra, A.K. and Penzien, J., (1980), "Rocking Response of Rigid Blocks to Earthquakes", Report No.UCB/EERC-80/02, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.