



Estudio de movimientos de ladera activados por terremotos en Andorra

Study of earthquake-induced landslides in Andorra

S. Figueras⁽¹⁾, X. Goula⁽¹⁾, H. Coral⁽¹⁾ y M. González⁽²⁾

⁽¹⁾Institut Cartogràfic de Catalunya. Parc de Montjuïc. 08038 Barcelona. Spain, sfigueras@icc.es

⁽²⁾CRECIT, Institut d'Estudis Andorrans, La Valireta 5, Andorra, crecit@andorra.ad

SUMMARY

Seismic studies in Andorra started at the beginning of 2001 with the creation of the Centre de Recerca en Ciències de la Terra (CRECIT). Andorra is a country characterized by a geology of quaternary glaciers valleys with a very particular topography and geotechnics. Andorra, being a mountainous country, is exposed to numerous natural risks like: avalanches, landslides, floods, earthquakes, fires, etc. that affect as much the life of the people as the infrastructures of the populations. In present paper several methodologies used in landslide seismic evaluation are revised and the Newmark analysis is used to estimate Newmark displacement as a function of landslide critical acceleration. Finally, a methodology for obtaining digital probabilistic seismic landslide hazard maps is described and proposed to be applied to Andorra.

1. INTRODUCCION

Los deslizamientos inducidos por terremotos están documentados desde el siglo IV a.c. Durante el siglo pasado causaron decenas de miles de muertos y billones de dólares en pérdidas económicas en todo el mundo. A pesar de su geomorfología y importancia económica, los deslizamientos inducidos por sismos aún no son bien comprendidos.

El riesgo en los deslizamientos inducidos por sismos depende de su abundancia, su movimiento característico y de la distribución de la población y de las construcciones. Aunque todos los tipos de deslizamientos inducidos por sismos muestran algún peligro para las vidas, en la sismicidad histórica más del 90% de los deslizamientos que han causado muertes son resultado de avalanchas de rocas, flujos rápidos de suelo y caída de bloques (Keefer, 1984). Son pocos los trabajos de zonificación de la peligrosidad de deslizamientos en los que incluya la causa sísmica, siendo éste el propósito del presente trabajo, en el que se incluye una revisión del estado del arte de diferentes metodologías y se sugiere aquella que más se ajuste a las condiciones de las zonas más urbanizadas del Principado de Andorra. La topografía de alta montaña que presenta el Principado de Andorra más la rigurosa climatología junto a la posibilidad de producirse un sismo predisponen al desencadenamiento de deslizamientos. El gran desarrollo urbanístico que presenta el Principado desde mediados del siglo XX, hace que sea un referente en cuanto a la necesidad de gestión del riesgo que suponen los deslizamientos.

2. ANTECEDENTES

Existen muchas publicaciones que presentan diferentes metodologías para la evaluación de la peligrosidad de deslizamientos. Algunas técnicas se basan en la determinación directa de la peligrosidad usando mapas geomorfológicos, mientras que otras se basan en la determinación indirecta de la peligrosidad mediante modelos estadísticos y deterministas, que interrelacionan los factores de relieve y la distribución de los deslizamientos. Existen trabajos que combinan las dos técnicas, directas e indirectas.

Se han desarrollado modelos matemáticos del mecanismo de los deslizamientos para medir y expresar la estabilidad del talud en condiciones estáticas (asísmico) y dinámicas (sísmico). Así mismo existen métodos basados en soluciones empíricas. Los métodos más usados son los propuestos por Newmark (1965), Jibson (1993) y Jibson et al. (1998) recopilados en Monge (2002). Estos métodos requieren de una evaluación de la aceleración crítica para determinar el desplazamiento permanente inducido por los deslizamientos. La aceleración crítica es la mínima aceleración pseudoestática requerida para producir la inestabilidad.

3. CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS Y GEOTÉCNICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la figura 1 se presenta una vista general de Andorra la Vella la zona de estudio considerada en este trabajo. Los tipos de deslizamientos más frecuentes son los desprendimientos, grandes deslizamientos, corrientes de derrubios y los movimientos superficiales del terreno.



Figura 1 – Vista general de la zona de estudio. (General view of the zone of study.)

Se dispone de un mapa geológico digital a escala 1:50000 con la información básica de todo el territorio de Andorra (CRECIT, 2002), del cual se obtienen gran parte de los elementos necesarios para el análisis preliminar de la peligrosidad sísmica de deslizamientos inducidos por terremotos.

Las litologías del substrato rocoso y de las formaciones superficiales de las laderas quedan individualizadas, según el mapa geológico, en cinco categorías fundamentales que son: (a) rocas masivas calcáreas, (b) pizarras grises con intercalaciones calcáreas, (c) margocalcáreas y pizarras violáceas, (d) granodioritas con biotita, y (e) intercalaciones de calcáreas y pizarras. Para tener una visión de la estimación de las propiedades mecánicas de estas litologías, se ha realizado una revisión bibliográfica dirigida a obtener las propiedades mecánicas de cohesión (c) y ángulo de fricción interna (f) que se presentan en la tabla 1, se utilizarán para el cálculo del factor de seguridad de las laderas.



Tabla 1 – Parámetros de resistencia de las distintas formaciones geológicas de Andorra. (Shear strengths assigned to geologic formations in Andorra.)

LITOLOGÍA	PARÁMETROS DE RESISTENCIA	
	C (lbs/pie2)	f(°)
Rocas calcáreas	Variación 600.0 – 1200.0	32 – 40
	Media 900.0	36
Pizarras+calcáreas grises	Variación 306.0 – 430.0	32 – 40
	Media 368.0	36
Margocalcareas y pizarras violáceas	Variación 110.0 – 156.0	30 – 45
	Media 133.0	38
Alternancias de calcáreas y pizarras marrones	Variación 306.0 – 430.0	32 – 40
	Media 368.0	38
Granodioritas con biotita	2040	41

4. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE NEWMARK

Se han seleccionado dos modelos para la evaluación preliminar de la peligrosidad de deslizamientos activados por sismos en el principado de Andorra, (Coral, 2003). Las metodologías de estos modelos tienen una base fundamentalmente empírica y se requiere el establecimiento de las condiciones mínimas que a priori debe tener la zona, tanto desde el punto de vista de las posibles inestabilidades como de los parámetros sísmicos estimados que razonablemente se pueden dar.

Los modelos seleccionados son el método de los desplazamientos de Newmark (1965) y el recientemente completado por Jibson (Jibson et al., 1998), para obtener mapas de probabilidad de peligrosidad digitales para deslizamientos activados por sismos. El análisis de Newmark calcula el desplazamiento de un deslizamiento (representado por un bloque rígido) bajo la acción de un movimiento sísmico. El desplazamiento, *u*, está calculado para dos entradas: la aceleración crítica *A_c* y un sismograma de un movimiento fuerte, donde está registrada la aceleración del suelo en función del tiempo *a(t)*.

Se han calculado las aceleraciones críticas a partir de las estimaciones de las propiedades físico-mecánicas de las cinco unidades litológicas predominantes de la zona en estudio. Con la ecuación 1 se calcula el factor de seguridad estático y con la ecuación 2 se obtiene, para cada litología, la aceleración crítica considerando diferentes pendientes.

$$FS = \frac{c'}{g \cdot \text{sen } q} + \frac{\tan f'}{\tan q} - \frac{m \cdot g_w \cdot \tan f'}{g \cdot \tan q} \quad (1)$$

donde,

f', es el ángulo de fricción efectivo; *c'*, es la cohesión efectiva; *q*, es el ángulo de talud; *g*, es el peso unitario del material del talud; *g_w*, es el peso unitario del agua; *t*, es el espesor normal a la superficie de falla plana *ym*, es la proporción de la superficie de falla plana que está saturada.

La aceleración crítica para diferentes pendientes y materiales se calcula a partir de la ecuación 2:

$$A_c = (FS - 1) \cdot g \cdot \text{sen } q \quad (2)$$

A partir del espectro de respuesta con período de retorno 475 años y amortiguamiento del 5% adoptado en Andorra (Secanell et al., 2003) se han seleccionado 3 acelerogramas representativos de un movimiento esperable de 0.1g. Con ellos se calcula el desplazamiento de Newmark (D), la condición necesaria para el cálculo es que *A_{máx}* > *A_c*, ésta solo se cumple para pendientes de 40° y superiores. La diferencia entre el valor máximo del movimiento sísmico y la aceleración crítica permite calcular el

desplazamiento de Newmark Los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 – Desplazamientos de Newmark obtenidos considerando diferentes litologías y pendientes de 40°. (Newmark displacements obtained in 40° slopes with different litologies.)

No.	Sismo	A _{max} (g's)	Distancia epicentral (km)	Aceleraciones críticas (g's) y desplazamientos (cm)		
				0.01 ⁽¹⁾	0.06 ⁽²⁾	0.10 ⁽³⁾
1	0207ya	0.120	8	0.730	0.067	0.001
2	0428za	0.076	23	4.069	0.005	0
3	0549ya	0.082	30	4.982	0.036	0

(1) Pizarras+calcáreas. (2) Margocalcáreas. (3) Rocas calcáreas.

El desplazamiento de Newmark puede asociarse al porcentaje de superficie desplazada aplicando la curva de probabilidad representada en la figura 2, propuesta por Jibson (Jibson et al., 1998) a partir de las observaciones de los deslizamientos producidos durante el sismo de Northridge (California) el año 1994. Los valores aquí determinados corresponden a desplazamientos pequeños y por tanto a probabilidades bajas en la curva de la figura 2.

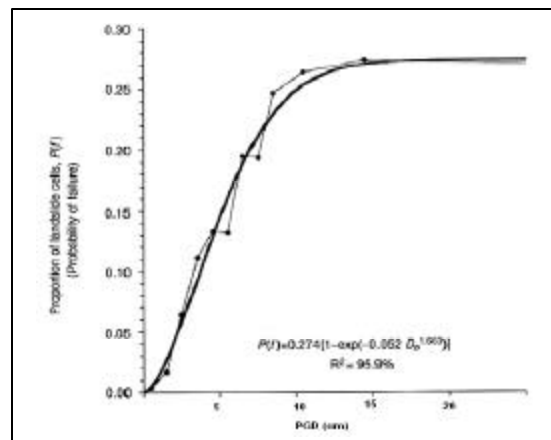


Figura 2 - Curva de probabilidad de deslizamiento en función del desplazamiento de Newmark (Jibson et al., 1998). (Probability of failure as function of Newmark displacement.)

5. CONCLUSIONES

Como resultado más importante destacamos que para el nivel sísmico de 0.1g esperable en Andorra, se obtiene una probabilidad de deslizamiento significativa que representa una superficie entre el 1%-13% de la superficie total para pendientes superiores a 40° en litologías formadas por calcáreas y pizarras.

6. REFERENCIAS

Coral, H. (2002). "Utilización de métodos experimentales y de simulación numérica para la microzonificación sísmica de áreas urbanizadas en Andorra". Tesis Doctoral, UPC, Barcelona. 207pp.
 CREDIT (2002). "Mapa geològic d'Andorra 1:50.000". Dipòsit legal: AND.183-2002. ISBN.99920-0-291-3
 Jibson, R.W. (1993). "Predicting earthquake-induced landslide displacements using Newmark's sliding block analysis" *Transportation Research Record*, no. 1411, pp. 9-17.
 Jibson, R. W., Harp, E. L., and Michael, J. A. (1998). A method for producing digital probabilistic seismic landslide hazard maps: an example from the Los Angeles, California, area". *Science for a changing world (USGS)*
 Keefer, D.K. (1984). "Landslides caused by earthquakes". *Geological Society of America Bulletin*, v. 95, pp. 406-421.
 Monge, O. (2002). "Risk-UE: An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different European Towns. Rapport GTR/RSK0101-152av4. 33pp.
 Newmark, N. M. (1965). "Effects of Earthquake on Dams and Embankments". *Geotechnique*, vol 15 No. 2, 1965, pp139-159.
 Secanell, R.; Irizarry, J.; Susagna, T.; Marín, C.; Goula, X.; Combes, P. y Fleta, J. (2003). "Evaluación unificada de la peligrosidad sísmica alrededor de la frontera entre Francia y España". *Proceed. 2º Congreso Nac. de Ing. Sísmica*, Málaga. 8pp.