

Medi Ambient i Riscs Naturals

ANNEX DE DOCUMENTACIÓ

INESTABILITAT DE VESSANTS I TALUSSOS

FACTOR DE SEGURETAT

Direcció:

Valentí TURU i MICHELS
Carrer Dr. Nequi 4, Andorra la Vella
Edifici Vilalta, pis 1 porta 3
Telèfon i fax: 321815 - 820323
Email: risc.dryas@igeotest.ad
<http://www.igeotest.ad>

Factors de seguretat per inestabilitat de vessants i talussos

Introducció

La bibliografia especialitzada sobre talussos, treballs en terres i estructures en terres marca coeficients de seguretat que oscil·len entre 1,2 i 2 tal com es pot apreciar en les següents taules:

Valors freqüents dels Factors de seguretat parcials mínims (BRINCH HANSEN & LUNDGREN, 1960 a JIMÉNEZ et al. 1981)		
Tipus d'obra	Paràmetre resistent	Factor de seguretat
Talussos	Cohesió	1,5- 2
Talussos	Angle de fregament intern	1,2- 1,5
Talussos	Resistència al tall	1,3 - 1,5

Factors de seguretat mínims (TERZAGHI & PECK, 1967)		
Tipus de trencament	Problema tipus	Factor de seguretat
Cisalla	Treballs de terres	1,3 - 1,5

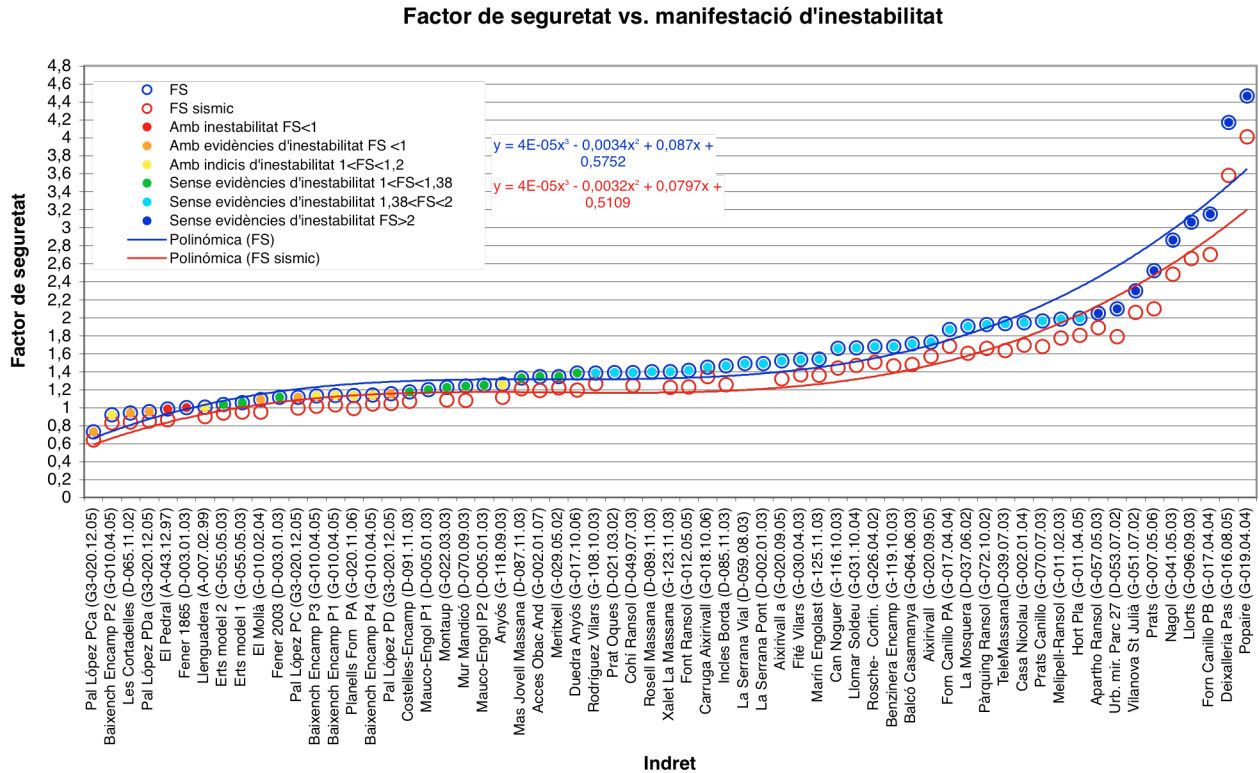
Factors de seguretat parcials (MEYERHOF, 1970) NRC (Canadà)		
ITEM	Paràmetre resistent	Factor de seguretat
Estructures de terres	Cohesió	1,5
Estructures de terres	Angle de fregament intern	1,2
Estructures de terres	Cohesió i angle de fregament	1,3 - 1,5

Taula 1: Compendi de factors de seguretat establerts de forma històrica en funció del paràmetre resistent dominant. La particularitat és que segons aquests investigadors cal aplicar aquest factor de seguretat als paràmetres de càlcul que intervenen en l'estabilitat.

Quan el factor de seguretat es troba en la unitat vol dir que les forces motors i les forces resistents estan igualades i el vessant es troba al límit de l'estabilitat. No obstant, hi ha moltes incerteses que envolten el model geològic suposat, el model reològic suposat (paràmetres geomecànics), el model hidrogeològic suposat, que fa que hom no estigui segur si $FS = 1$ impliqui estar en el límit de l'estabilitat o bé en la inestabilitat. Per aquest motiu cal majorar el FS, de forma a minvar les incerteses. La clau està en saber quin és el FS a adoptar com a segur; és a dir, quin és el FS que absorbeix aquestes incerteses.

El cas del Principat d'Andorra

En base a un recull d'estudis d'estabilitat del vessant mitjançant el càlcul del factor de seguretat al llarg del Principat d'Andorra (**gràfic 1**) hom suggereix uns llindars pels factors de seguretat a tenir en compte per a una zona de muntanya com és el Principat d'Andorra.



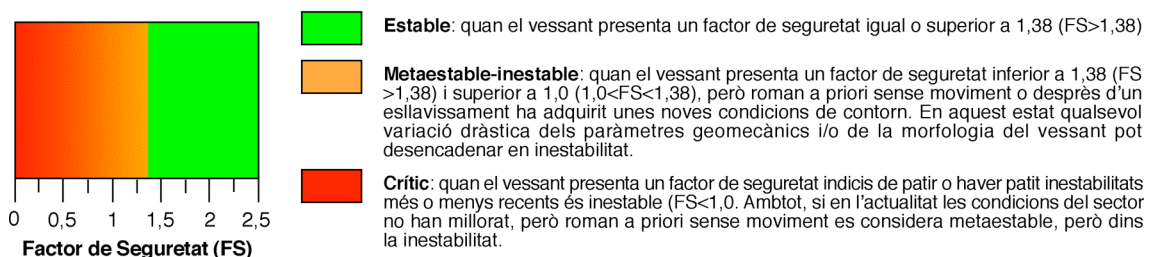
Gràfic 1: Estrudis d'estabilitat del vessant i de talussos efectuats entre 1997 i 2007. Línia blava sense eventuals perturbacions. Línia vermella tenint en compte la sismicitat segons BOE núm. 244. Real Decret 997/2002, de 27 de setembre, pel qual s'aprova la norma sísmoresistent: part general i edificació (NCSR-02)

Al mateix **gràfic 1** també s'han representat els factors de seguretat que presentarien els mateixos vessants, en el cas d'haver-hi un terratrèmol. En base a la normativa sísmoresistent espanyola (**gràfic 1**), hom ha tingut en compte un coeficient d'acceleració sísmica de **0,06 g** per al sector d'Andorra. Al gràfic s'observa com els factors de seguretat dels vessants disminueixen.

A partir de les evidències geomorfològiques i històriques d'ineestabilitat de diversos vessants estudiats al Principat, s'ha determinat quan s'assoleix l'estabilitat d'un vessant (**gràfic 1**). Els casos estudiats són diversos, però existeixen bons exemples d'ineestabilitats com els manifestats al Fener el 1865 o al Pedral els anys 1996 i 1997 han estat utilitzats per elaborar el **gràfic 1**. En el cas del Pedral (Encamp Vell) la inestabilització del conus de dejecció causà diversos danys estructurals als edificis del sector; en el cas del Fener al 1865 que va experimentar un procés d'ineestabilització que va durar diversos dies afectant aquest antic poble de l'obac d'Andorra. Tant el cas del Pedral com el del Fener es van assolir valors de factor de seguretat inferiors a 0,9 i hom considera que s'està dins d'un **camp** d'estabilitat **crític** (**gràfic 2**).

No obstant, també existeixen altres sectors amb factors de seguretat al voltant d'1 que presenten evidències d'ineestabilitat com són el sector de Pal, el sector de El Mollà (Encamp) i Les Cortadelles (dins del Pedral); amb tot, no sempre aquestes inestabilitats s'acaben generant. Finalment hom troba sectors amb certs indicis d'ineestabilitat, dels quals la major part presenten uns factors de seguretat al voltant d'1,1, com són els casos del torrent de les Corballes (Baixench, Encamp), els Planells del Forn (Canillo), la Llenguadera (Vila, Encamp), o Anyós. En aquests darrers casos s'ha considerat que s'estan dins del **camp metaestable-ineestable** (veure **gràfic 2**). Dins d'aquest camp també s'han inclòs aquells sectors que presenten valors de factor de seguretat compresos entre 1 i 1'38, ja que es considera que potencialment poden derivar en inestabilitat en cas de condicions molt adverses o amb l'efecte d'un sisme que faria rebaixar el seu factor de seguretat. Aquest és el cas ocorregut a la Portalada el 10 d'agost 2019. Aquí el desmunt rocós de més de 30 metres d'alçada es desplomà després de 30 anys d'exposició. El desmunt de la Portalada data de finals de la dècada de 1980 i amb el bulonat del moment presentava un FS = 1,3 (camp **metaestable-ineestable**, exp: D-007.05.09). En aquest cas les condicions adverses foren la seva llarga exposició sense un manteniment dels sistemes d'estabilització (gunita i bulonat), tal com ja es va advertir al 2017 (expedient: D-).

Estabilitat versus Factors de Seguretat parcials



Gràfic 2: Esquema visual dels camps d'estabilitat i metaestabilitat. S'han tingut en compte els factors de seguretat mínims que s'esdevindrien en el cas de l'ocurrència d'un sisme o a situacions extremes (llarga exposició, tempestes d'aigua, sobrecàrrega, i altres).

Finalment, en el cas de produir-se una sobrecàrrega sísmica com la especificada a la norma sismoresistent espanyola es pot dir que, els vessants naturals en els quals el factor de seguretat calculat presenta valors superiors a **1,38** és mantindrien per sobre d'**1,15**. Cal fer esment que no s'observen símptomes d'inestabilitat en els vessants que presenten un factor de seguretat superior a **1,38** i pertant s'han considerat que s'estan dins del **camp estable** (gràfic 2).

Consideracions a explorar

Una altra fórmula novadosa per avaluar l'estabilitat dels vessants és mitjançant l'índex de confiança (reliability index). Segons Duncan (2000), els factors de seguretat presenten incerteses en els seus càlculs, i de fet mai és possible calcular-los perfectament ajustats; no obstant l'experiència, ha ajudat a desenvolupar quins valors de factor de seguretat cal aplicar en distintes situacions. Per exemple el *U.S Army Corps of Engineers* i altres agències usen factors de seguretat (FS) d'1,5 per estabilitat de vessants a llarg temps. Molts enginyers geotècnics utilitzen FS entre 2,5-3,0 per capacitat portant, i el mateix rang de valors de seguretat contra l'erosió (xaragalls) i el *piping* (sots). Així es requereix el mateix valor per totes les aplicacions de factor de seguretat a llarg termini, un valor per tots, el que representa que en molts casos els factors de seguretat són inapropiats. Una aproximació més lògica hauria de considerar les incerteses en quantitat que entren els càlculs, i les conseqüències insatisfactòries de l'event (d'anys). Això pot ser fer-se aproximadament prenent factors de seguretat segons la relació següent:

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Reducció de la probabilitat*} \\ \text{de l'esllavissament associat} \\ \text{amb un disseny més segur} \\ \text{*veure quadre inferior} \\ \hline \end{array}
 \times
 \begin{array}{|c|} \hline \text{Cost} \\ \text{de} \\ \text{l'esdeveniment} \\ \hline \end{array}
 <
 \begin{array}{|c|} \hline \text{Despeses afegides} \\ \text{per un disseny} \\ \text{més segur} \\ \hline \end{array}$$

Probabilities That Factor of Safety Is Smaller than 1.0, Based on Lognormal Distribution of Factor of Safety

F_{MLV}	Coefficient of Variation of Factor of Safety (V_f)														
	2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	20%	25%	30%	40%	50%	60%	80%
1.05	0.8%	12%	22%	28%	33%	36%	39%	41%	44%	47%	49%	53%	55%	58%	61%
1.10	0.00%	0.9%	6%	12%	18%	23%	27%	30%	35%	40%	43%	48%	51%	54%	59%
1.15	0.00%	0.03%	1.1%	4%	9%	13%	18%	21%	27%	33%	37%	43%	48%	51%	56%
1.16	0.00%	0.01%	0.7%	3%	8%	12%	16%	20%	26%	32%	36%	42%	47%	50%	56%
1.18	0.00%	0.00%	0.3%	2%	5%	9%	13%	17%	23%	29%	34%	41%	45%	49%	55%
1.20	0.00%	0.00%	0.13%	1.2%	4%	7%	11%	14%	21%	27%	32%	39%	44%	48%	54%
1.25	0.00%	0.00%	0.01%	0.3%	1.4%	4%	6%	9%	15%	22%	27%	35%	41%	45%	51%
1.30	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.5%	1.6%	3%	6%	11%	17%	23%	31%	37%	42%	49%
1.35	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.2%	0.7%	1.9%	4%	8%	14%	19%	28%	34%	40%	47%
1.40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.3%	1.0%	2%	5%	11%	16%	25%	32%	37%	45%
1.50	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.2%	0.7%	3%	6%	11%	19%	27%	32%	41%
1.60	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.05%	0.2%	1.1%	4%	7%	15%	22%	28%	38%
1.70	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.06%	0.5%	2%	5%	12%	19%	25%	34%	44%
1.80	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.2%	1.2%	3%	9%	16%	22%	31%	41%
1.90	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.08%	0.65%	2%	7%	13%	19%	29%	39%
2.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.36%	1.3%	5%	11%	17%	26%	36%
2.20	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.10%	0.56%	1.3%	8%	13%	22%	32%
2.40	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.23%	1.9%	5%	10%	19%	29%
2.60	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.09%	1.1%	4%	7%	16%	26%
2.80	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.66%	3%	6%	13%	23%
3.00	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.39%	1.8%	4%	11%	21%

Note: F_{MLV} = factor of safety computed using most likely values of parameters.

Amb aquesta avaluació es pot valorar millor quan cal majorar o quan es pot minorar un factor de seguretat en base a l'augment del cost que representa augmentar un factor de seguretat en relació amb la disminució de la probabilitat d'ocurrència del fenomen. Així si un augment del factor de seguretat reverteix en una molt lleugera disminució de la probabilitat d'ocurrència i el sobrecost és molt elevat no té sentit aplicar un factor de seguretat majorat; per contra si amb un augment del factor de seguretat s'aconsegueix reduir considerablement la probabilitat d'ocurrència (i de retruc els possibles costos pels danys que podria causar) té lògica augmentar aquest factor de seguretat.

Chowdhury & Flentje (2003) suggereixen valors mínims d'índex de confiança (reliability index) per vessants naturals. Aquests índex de confiança tenen en compte la morfologia i la cobertura del vessant, la potencialitat d'essllavissament i el risc, així com la probabilitat màxima d'essllavissament.

Reliability index and failure probability of natural slopes – suggested values

Slope type and location	Potential failure mode	Potential consequences	Minimum reliability index	Maximum failure probability
Wooded/forested slopes, moderate to steep inclination, colluvium or residual soil cover	Shallow sliding, limited movement or just slope deformation without overall failure	No elements at risk, no potential for debris flow formation	1	0.15 (15%) (15×10^{-2})
Slopes of low to moderate inclination in which high pore water pressures can develop, forested or cleared sloping areas	Slow-moving slides, shallow to deep-seated, relatively flat slip surfaces	No potential for catastrophic failure without warning signs. Progressive action during successive rainstorms may induce complete failure over time; no elements at risk	1.5	0.05 (5%) (5×10^{-2})
Relatively steep slopes with high relief in forested or cleared areas, slopes near natural gullies, colluvium or residual soil cover	Shallow sliding with rapid movement and potential for large travel distances	Significant potential for debris flow formation during intense storms, considerable travel distance; elements at low to moderate risk of damage	2	0.01 (1%) (1×10^{-2})
Slopes in which high pore pressure can develop; near urbanised areas	Sliding with rapid movement, shallow to deep slip surfaces with relatively steep inclination	Elements at moderate to high risk of damage or destruction from landsliding	2.5	0.005 (0.5%) (5×10^{-3})
Slopes in which high pore pressures can develop; very close to properties in urbanised areas	Sliding with rapid movement, shallow to deep slip surfaces with relatively steep inclination	Elements at high to very high risk of destruction from landsliding	3	0.001 (0.1%) (1×10^{-3})

Chowdhury & Flentje. In Bull Eng Geol Env (2003) 62:41-46