

Modos de Falla Planar de Taludes Secos Cinemáticamente Estables

Se presentan criterios para modos de falla planar diferentes a deslizamiento para los taludes cinemáticamente estables ($\beta = \delta$). Se investigan los modos de falla por pandeo, compresión, flexión y esfuerzo cortante, estos dos últimos especialmente para el caso de sismo. Se presentan tablas y gráficos que ayudan a evaluar los modos de falla.

ALVARO J. GONZALEZ GARCIA
 IC, MSc, DIC
 Socio - Ingeniería e Hidrosistemas Ltda.
 Profesor Asociado - Universidad Nacional
 Profesor Postgrado - Universidad Javeriana

En la naturaleza, en la construcción de obras y en las explotaciones mineras se presentan taludes en roca para los cuales el ángulo del talud coincide con el de la discontinuidad principal (Figura 2). Esta condición impide cinemáticamente una falla por deslizamiento a lo largo de esta discontinuidad, hecho que se aprovecha para el diseño cuando el factor de seguridad al deslizamiento es menor que la unidad, haciendo precisamente coincidir el talud con el plano de la discontinuidad crítica.

Sin embargo, aunque la falla no es posible por deslizamiento simple, pueden presentarse otros modos de falla, los cuales es indispensable tener en cuenta para poder garantizar la estabilidad del talud. Los modos de falla que se analizan en este trabajo incluyen pandeo, compresión simple, flexo-compresión y esfuerzo cortante para taludes sin agua. En un próximo trabajo se presentarán resultados para taludes con agua.

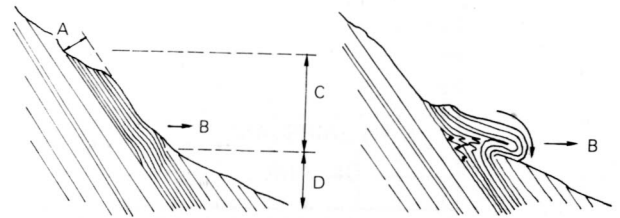


FIGURA 1. Estructura de arrastre

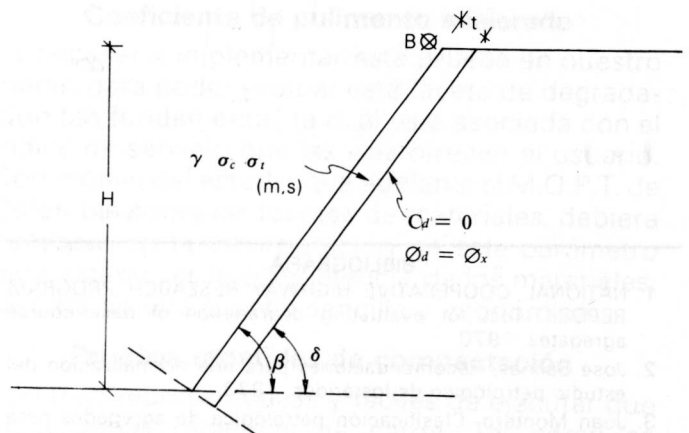


FIGURA 2. Condiciones geométricas y propiedades.

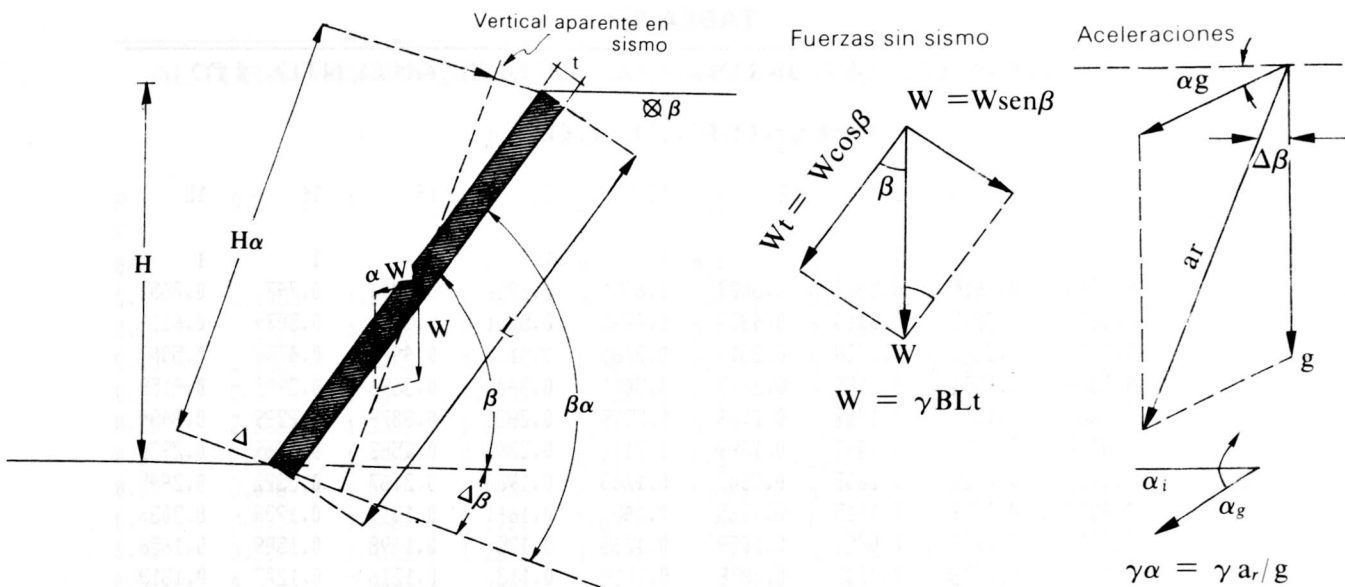


FIGURA 3. Relaciones geométricas y fuerzas con y sin sismo.

Estos modos de falla se presentan especialmente cuando el material expuesto es de naturaleza relativamente débil, dúctil e impermeable y no está muy fracturado. Los efectos se acentúan o se presentan cuando ocurren sismos, presiones altas de agua o cuando el material expuesto se debilita por acción de la alteración.

Ejemplos típicos que se presentan en la naturaleza y que confirman la existencia de modos de falla diferentes al deslizamiento simple en el caso que nos ocupa, son los denominados "estructura de arrastre", que han sido estudiados por los geólogos en varias partes del mundo y en Colombia algunos de ellos han sido tratados por Julivert en sus trabajos acerca del cretáceo sedimentario en la Sabana de Bogotá (Julivert, 1961 y 1962), de los cuales nos permitimos transcribir un dibujo bastante descriptivo (Figura 1).

NOMENCLATURA E HIPOTESIS DE ANALISIS

Nomenclatura

En el presente trabajo se ha adoptado la siguiente nomenclatura: (Ver figuras 2 y 3).

a) Geometría

- β = ángulo de buzamiento del talud
- δ = ángulo de buzamiento de la discontinuidad principal.
- H = altura del talud
- B = profundidad del talud
- L = longitud de la losa expuesta = $H/\sin \beta$
- t = espesor del material expuesto
- A = área de la losa = Bt
- i = ángulo de buzamiento del vector aceleración del sismo.
- $\Delta\beta$ = ángulo de la resultante de aceleración con la vertical

b) Propiedades de los materiales

- γ = peso unitario del material expuesto
- σ_c = resistencia a la compresión simple del material expuesto

- σ_t = resistencia a tracción simple del material expuesto
- E = módulo de elasticidad del material expuesto
- C_d, ϕ_d = parámetros de Mohr-Coulomb para resistencia de la discontinuidad
- j, ϕ_r = parámetros de Barton para resistencia de la discontinuidad.

c) Fuerzas, esfuerzos, aceleraciones

- W = peso de la losa de material expuesto = BLt
- W_T, W_N = componentes de W paralelos y normales al talud
- T = componente neto paralelo al talud
- N = componente normal del talud
- M_o = momento de flexión
- V = fuerza cortante
- σ = esfuerzo de compresión
- τ = esfuerzo de corte
- g = aceleración de la gravedad
- a_s = aceleración máxima por sismo

d) Números adimensionales

- $f = \frac{\tan \phi_r}{\tan \beta}$ = factor de seguridad al deslizamiento
- m = t/H = espesor normalizado
- $h_n = \gamma H / \sigma_c$ = altura normalizada
- $P = 1/6 M \pi^2 m^2$ = número de pandeo
- hnc, hnp = altura máxima normalizada por compresión y por pandeo
- G = γ / γ_w = peso unitario específico del material expuesto
- $\alpha = a_s / g$ = aceleración de sismo en fracción de la gravedad
- $\epsilon = E / \gamma H$ = módulo elástico normalizado
- M = E / σ_c = módulo elástico relativo

e) Subíndices

- max = máximo
- min = mínimo
- crit = crítico
- c = compresión
- t = tracción
- p = pandeo
- α = condición bajo sismo
- M = mayor
- m = menor

TABLA 1

FACTOR DE SEGURIDAD AL DESLIZAMIENTO (f)

$$f = \frac{\tan(\Phi R)}{\tan(\Phi)}$$

FR	2	4	6	8	10	12	14	16	18
B-FR									
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0.2844	0.4415	0.5467	0.6087	0.6581	0.6952	0.7241	0.747	0.7655
10	0.1643	0.2585	0.3665	0.4325	0.4845	0.5261	0.56	0.5879	0.6111
15	0.1142	0.2031	0.2738	0.3311	0.3781	0.4172	0.4498	0.4772	0.5003
20	0.0844	0.1571	0.2155	0.2643	0.3054	0.3403	0.3696	0.3947	0.4159
25	0.0685	0.1267	0.1749	0.2164	0.2518	0.2821	0.3079	0.3299	0.3484
30	0.0559	0.1037	0.1447	0.1799	0.2101	0.2361	0.2582	0.2769	0.2926
35	0.0463	0.0864	0.1209	0.1507	0.1763	0.1982	0.2167	0.2322	0.2448
40	0.0388	0.0724	0.1015	0.1265	0.148	0.1661	0.1811	0.1934	0.203
45	0.0326	0.0608	0.0851	0.1059	0.1235	0.138	0.1498	0.1589	0.1656
50	0.0273	0.0519	0.0709	0.0878	0.1018	0.113	0.1216	0.1277	0.1313
55	0.0227	0.042	0.0583	0.0716	0.0822	0.0902	0.0957	0.0987	0.0993
60	0.0186	0.0341	0.0468	0.0568	0.0642	0.0691	0.0715	0.0715	0.0691
65	0.0148	0.0268	0.0362	0.043	0.0472	0.0491	0.0485	0.0454	0.0399
70	0.0113	0.0201	0.0267	0.0299	0.0311	0.0299	0.0262	0.0201	0.0113
75	8.1E-03	0.0136	0.0166	0.0173	0.0154	0.0111	4.4E-03	-5.0E-03	-0.017
80	4.9E-03	7.3E-03	7.3E-03	4.9E-03	3.1E-03	-7.4E-03	-0.0174	-0.0301	-0.0457
85	1.8E-03	1.2E-03	-1.8E-03	-7.4E-03	-0.0154	-0.0261	-0.0395	-0.0557	-0.075
90	-1.2E-03	-4.9E-03	-0.011	-0.0198	-0.0311	-0.0452	-0.0622	-0.0822	-0.1056

FR	20	22	24	26	28	30	35	40	45
B-FR									
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0.7805	0.7925	0.8002	0.8117	0.8188	0.8245	0.8345	0.8391	0.8391
10	0.6304	0.6466	0.6601	0.6713	0.6806	0.6881	0.7002	0.7041	0.7002
15	0.5198	0.5362	0.5498	0.5611	0.5702	0.5774	0.5875	0.5875	0.5774
20	0.4338	0.4487	0.461	0.471	0.4788	0.4845	0.4903	0.4845	0.4663
25	0.364	0.3768	0.387	0.395	0.4007	0.4043	0.4043	0.3913	0.364
30	0.3054	0.3157	0.3235	0.329	0.3322	0.3333	0.3265	0.3054	0.2679
35	0.2549	0.2624	0.2675	0.2704	0.2709	0.2692	0.2549	0.2248	0.1763
40	0.2101	0.2148	0.2172	0.2172	0.2148	0.2101	0.1876	0.148	0.0575
45	0.1697	0.1715	0.1709	0.1679	0.1626	0.1547	0.1235	0.0734	0.0175
50	0.1325	0.1313	0.1277	0.1216	0.113	0.1018	0.0613	0.0146	-0.0875
55	0.0975	0.0933	0.0865	0.0772	0.0653	0.0505	0.0122	-0.0734	-0.1763
60	0.0642	0.0568	0.0468	0.0341	0.0196	0.0101	-0.0613	-0.148	-0.2679
65	0.0312	0.0212	7.8E-03	-0.5E-03	-0.0279	-0.0505	-0.1235	-0.2248	-0.364
70	6.4E-03	-0.0141	-0.0311	-0.0513	-0.0747	-0.1018	-0.1876	-0.3054	-0.4663
75	-0.0318	-0.0496	-0.0705	-0.0948	-0.1228	-0.1547	-0.2549	-0.3913	-0.5773
80	-0.0642	-0.0857	-0.111	-0.1399	-0.1723	-0.2101	-0.3265	-0.4845	-0.7002
85	-0.0975	-0.1235	-0.1533	-0.1872	-0.2257	-0.2692	-0.4043	-0.5875	-0.8391
90	-0.1325	-0.1632	-0.1982	-0.2379	-0.2827	-0.3333	-0.4903	-0.7041	-1

Hipótesis de análisis

Para los análisis que se presentan se han supuesto las siguientes hipótesis

a) $C_d = 0$; }
 $\phi_d = \phi_r$ } en la discontinuidad, independiente del sismo (caso más crítico) y se emplea solo la hipótesis de Mohr-Coulomb.

b) $\frac{\partial \sigma_c}{\partial t} = 0$ simplificación que para rocas relativamente débiles puede ser aceptable.

c) Condiciones de pandeo de Euler.

e) Condiciones promedias en la losa y la discontinuidad crítica sin considerar las variaciones a lo largo de ellas.

f) Materiales homogéneos, isotrópicos y lineales.

CONDICIONES CINEMATICAS Y ESTATICAS

Para que ocurra falla planar por deslizamiento simple se requiere que

TABLA 2

ALTURA NORMALIZADA MAXIMA POR COMPRESION (h_{nc}/p)
$$h_{nc}/p = 1/p / (1-f)$$

P	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
F								
0	2	1	0.6667	0.5	0.4	0.3333	0.2857	0.25
0.05	2.1053	1.0526	0.7018	0.5263	0.4211	0.3509	0.3008	0.2632
0.1	2.2222	1.1111	0.7407	0.5556	0.4444	0.3704	0.3175	0.2778
0.15	2.3529	1.1765	0.7843	0.5882	0.4706	0.3922	0.3361	0.2941
0.2	2.5	1.25	0.8333	0.625	0.5	0.4167	0.3571	0.3125
0.25	2.6667	1.3333	0.8889	0.6667	0.5333	0.4444	0.381	0.3333
0.3	2.8571	1.4286	0.9524	0.7143	0.5714	0.4762	0.4082	0.3571
0.35	3.0769	1.5385	1.0256	0.7692	0.6154	0.5128	0.4396	0.3846
0.4	3.3333	1.6667	1.1111	0.8333	0.6667	0.5556	0.4762	0.4167
0.45	3.6364	1.8182	1.2121	0.9091	0.7273	0.6061	0.5195	0.4545
0.5	4	2	1.3333	1	0.8	0.6667	0.5714	0.5
0.55	4.4444	2.2222	1.4815	1.1111	0.8889	0.7407	0.6349	0.5556
0.6	5	2.5	1.6667	1.25	1	0.8333	0.7143	0.625
0.65	5.7143	2.8571	1.9048	1.4286	1.1429	0.9524	0.8163	0.7143
0.7	6.6667	3.3333	2.2222	1.6667	1.3333	1.1111	0.9524	0.8333
0.75	8	4	2.6667	2	1.6	1.3333	1.1429	1
0.8	10	5	3.3333	2.5	2	1.6667	1.4286	1.25
0.85	13.3333	6.6667	4.4444	3.3333	2.6667	2.2222	1.9048	1.6667
0.9	20	10	6.6667	5	4	3.3333	2.8571	2.5
0.95	40	20	13.3333	10	8	6.6667	5.7143	5
0.99	200	100	66.6667	50	40	33.3333	28.5714	25

P	5	6	7	8	9	10	15	20
F								
0	0.2	0.1667	0.1429	0.125	0.1111	0.1	0.0667	0.05
0.05	0.2105	0.1754	0.1504	0.1316	0.117	0.1053	0.0702	0.0526
0.1	0.2222	0.1852	0.1587	0.1389	0.1235	0.1111	0.0741	0.0556
0.15	0.2353	0.1961	0.1681	0.1471	0.1307	0.1176	0.0784	0.0588
0.2	0.25	0.2083	0.1786	0.1563	0.1389	0.125	0.0833	0.0625
0.25	0.2667	0.2222	0.1905	0.1667	0.1481	0.1333	0.0889	0.0667
0.3	0.2857	0.2381	0.2041	0.1786	0.1587	0.1429	0.0952	0.0714
0.35	0.3077	0.2564	0.2198	0.1923	0.1709	0.1538	0.1026	0.0769
0.4	0.3333	0.2778	0.2381	0.2083	0.1852	0.1667	0.1111	0.0833
0.45	0.3636	0.303	0.2597	0.2273	0.202	0.1818	0.1212	0.0909
0.5	0.4	0.3333	0.2857	0.25	0.2222	0.2	0.1333	0.1
0.55	0.4444	0.3704	0.3175	0.2778	0.2469	0.2222	0.1481	0.1111
0.6	0.5	0.4167	0.3571	0.3125	0.2778	0.25	0.1667	0.125
0.65	0.5714	0.4762	0.4082	0.3571	0.3175	0.2857	0.1905	0.1429
0.7	0.6667	0.5556	0.4762	0.4167	0.3704	0.3333	0.2222	0.1667
0.75	0.8	0.6667	0.5714	0.5	0.4444	0.4	0.2667	0.2
0.8	1	0.8333	0.7143	0.625	0.5556	0.5	0.3333	0.25
0.85	1.3333	1.1111	0.9524	0.8333	0.7407	0.6667	0.4444	0.3333
0.9	2	1.6667	1.4286	1.25	1.1111	1	0.6667	0.5
0.95	4	3.3333	2.8571	2.5	2.2222	2	1.3333	1
0.99	20	16.6667	14.2857	12.5	11.1111	10	6.6667	5

$$\beta > \delta > \phi, \quad (i)$$

La primera parte de la desigualdad implica la condición cinemática, es decir, que sea posible físicamente el movimiento a lo largo del plano de

la discontinuidad. La segunda parte de la desigualdad representa la condición estática, es decir, que las fuerzas actuantes sean mayores que las resistentes.

Para el presente trabajo se consideran las si-

TABLA 3

ALTURA NORMALIZADA MAXIMA POR PANDEO (hnp/p)

$$hnp/p = \sin(FR)^2 / (F^2 * \cos(FR)^2 + \sin(FR)^2) / (1-F)$$

P	2	4	6	8	10	12	14	16	18
F									
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.05	0.3451	0.6965	0.8584	0.9344	0.9743	0.9974	1.0119	1.0216	1.0283
0.1	0.1208	0.3649	0.5832	0.7377	0.8407	0.9098	0.9571	0.9906	1.015
0.15	0.0605	0.21	0.3874	0.55	0.6825	0.7854	0.8638	0.9237	0.9698
0.2	0.037	0.1362	0.2705	0.4132	0.5467	0.663	0.7606	0.8409	0.9065
0.25	0.0255	0.0967	0.2003	0.3202	0.4429	0.5594	0.6649	0.7575	0.8375
0.3	0.0191	0.0736	0.1562	0.2571	0.3668	0.4775	0.5836	0.682	0.7712
0.35	0.0152	0.0591	0.1273	0.2136	0.3114	0.4145	0.5179	0.6179	0.7121
0.4	0.0126	0.0494	0.1076	0.1831	0.2712	0.367	0.4664	0.5658	0.6625
0.45	0.0109	0.0429	0.0941	0.1616	0.242	0.3317	0.4271	0.5251	0.6231
0.5	9.7E-03	0.0384	0.0846	0.1464	0.2212	0.3061	0.3983	0.495	0.5938
0.55	8.9E-03	0.0353	0.0783	0.1362	0.2071	0.2888	0.3788	0.4749	0.5749
0.6	8.4E-03	0.0335	0.0744	0.13	0.1987	0.2788	0.3681	0.4648	0.5669
0.65	8.2E-03	0.0327	0.0728	0.1276	0.1958	0.276	0.3665	0.4654	0.5712
0.7	8.3E-03	0.0329	0.0735	0.1292	0.1989	0.2814	0.3753	0.479	0.5909
0.75	8.7E-03	0.0345	0.077	0.1357	0.2095	0.2974	0.3981	0.5101	0.6321
0.8	9.5E-03	0.0379	0.0848	0.1497	0.2316	0.3297	0.4427	0.5692	0.708
0.85	0.0112	0.0448	0.1004	0.1774	0.275	0.3924	0.5282	0.6812	0.8499
0.9	0.015	0.06	0.1345	0.238	0.3697	0.5283	0.7128	0.9216	1.1531
0.95	0.027	0.1078	0.2418	0.4283	0.6661	0.9535	1.2888	1.67	2.0945
0.99	0.1243	0.4964	1.1146	1.9755	3.0747	4.4066	5.9644	7.7399	9.7242

P	20	22	24	26	28	30	35	40	45
F									
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.05	1.0331	1.0368	1.0395	1.0417	1.0434	1.0448	1.0473	1.0489	1.05
0.1	1.0331	1.047	1.0578	1.0663	1.0732	1.0787	1.0889	1.0956	1.1001
0.15	1.0057	1.034	1.0565	1.0748	1.0897	1.1021	1.1248	1.14	1.1506
0.2	0.9601	1.004	1.0401	1.0701	1.0951	1.1161	1.1557	1.1828	1.2019
0.25	0.9059	0.9642	1.0137	1.0559	1.0919	1.1228	1.1826	1.2246	1.2549
0.3	0.8507	0.9209	0.9825	1.0364	1.0836	1.1249	1.207	1.2667	1.3106
0.35	0.7993	0.8789	0.9509	1.0155	1.0734	1.125	1.2309	1.3105	1.3706
0.4	0.7549	0.8417	0.9223	0.9965	1.0643	1.1261	1.2566	1.3581	1.4368
0.45	0.719	0.8115	0.8994	0.9821	1.0594	1.1311	1.2867	1.4121	1.512
0.5	0.6927	0.79	0.8845	0.9752	1.0614	1.1429	1.3246	1.4759	1.6
0.55	0.6758	0.7789	0.8797	0.9782	1.0735	1.165	1.3743	1.5544	1.7061
0.6	0.6725	0.7799	0.8878	0.9947	1.0997	1.2019	1.4415	1.6542	1.8382
0.65	0.682	0.7962	0.9124	1.0292	1.1454	1.26	1.5347	1.7856	2.0085
0.7	0.7094	0.833	0.9601	1.0894	1.2196	1.3495	1.6672	1.9655	2.2371
0.75	0.7625	0.8997	1.0423	1.1888	1.338	1.4864	1.8628	2.2236	2.56
0.8	0.8575	1.0161	1.1824	1.3549	1.532	1.7123	2.1689	2.6192	3.0488
0.85	1.033	1.2286	1.4353	1.6513	1.875	2.1047	2.6951	3.2903	3.8703
0.9	1.4056	1.6773	1.9661	2.2701	2.5873	2.9155	3.7706	4.6502	5.5249
0.95	2.56	3.0634	3.6018	4.172	4.7707	5.3945	7.0404	8.765	10.5125
0.99	11.907	14.2773	16.8229	19.5209	22.3877	25.3788	33.3442	41.8058	50.5025

güentes condiciones:

Cinemática $\beta = \delta$ (ii)

Estática $\delta \cong \phi_r$ (iii)

En el caso con sismo el valor equivalente del talud (β_a) reemplaza al valor d en especial para la condición estática.

ANALISIS DE MODOS DE FALLA

En las páginas subsiguientes se presentan las ecuaciones, tablas y gráficas que resumen los análisis de los modos de falla siguientes:

Sin sismo: Compresión
Pandeo

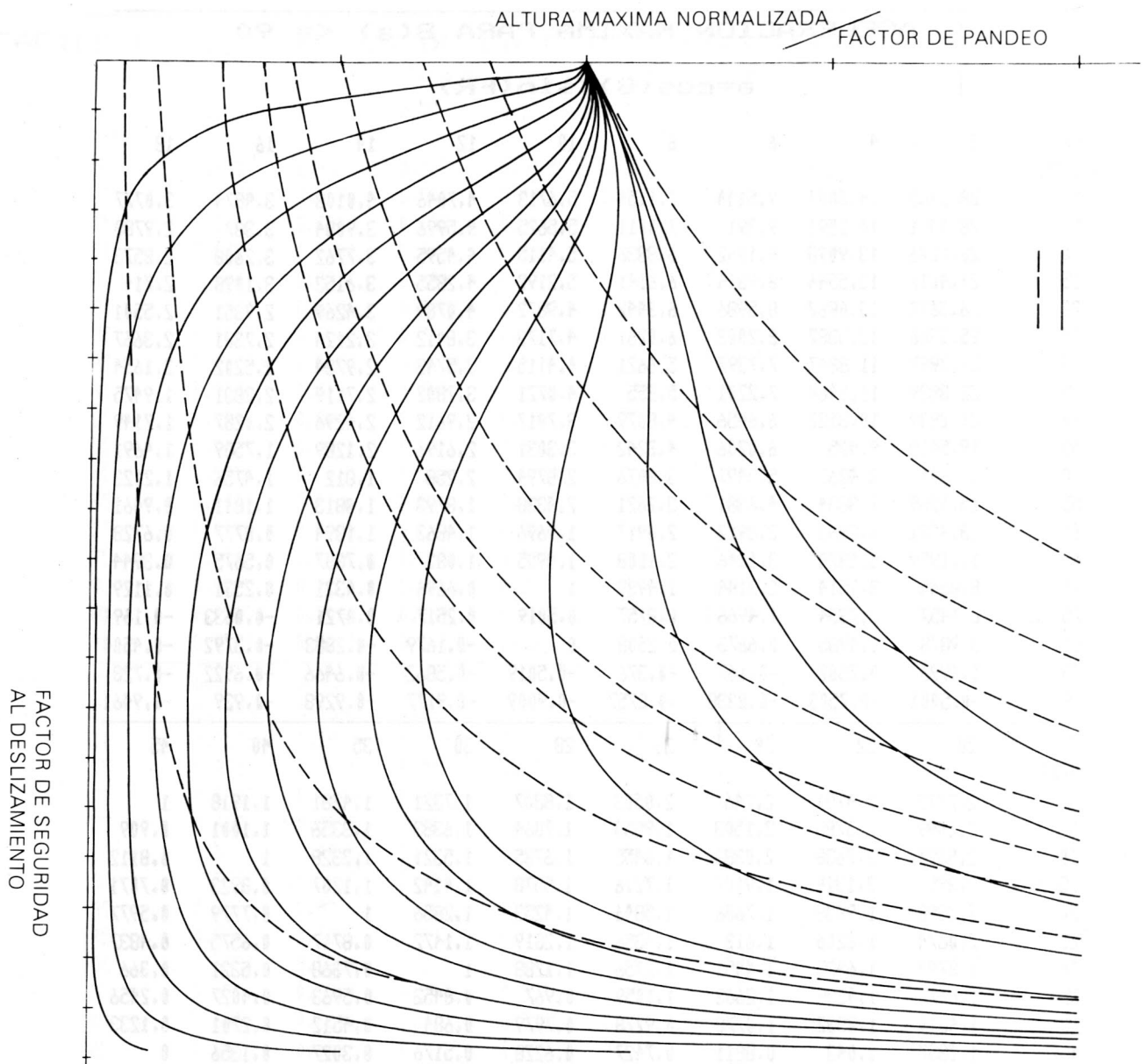


GRAFICO N° 1. Alturas normalizadas máximas para compresión y pandeo simples.

Con sismo: Compresión
 Pandeo
 Flexión (compresión, esfuerzo cortante)

c) Discriminación de modos de falla

$$\beta_o = \arcsin \sqrt{1/P} \quad (5)$$

si $\beta > \beta_o$ falla por compresión
 $\beta < \beta_o$ ó $P \leq 1$ falla por pandeo

d) Ayudas de cálculo

Condición sin sismo

a) Falla por compresión simple

$$h_{nc} = \frac{\gamma H_{maxc}}{\sigma_c} = \frac{1}{1-f}$$

b) Falla por pandeo simple

$$h_{np} = \frac{\gamma H_{maxp}}{\sigma_c} = P \frac{\sin^2 \beta}{1-f}$$

y $P = \frac{M\pi^2 m^2}{6}$

también $m_{min} = \frac{\sqrt{6/E(1-f)}}{\sin \beta}$

(1)

(2)

(3)

(4)

Tabla 1: Valores de f para $0 \leq \beta - \phi_r < 90^\circ$
 $0 < \phi_r \leq 45^\circ$

Tabla 2: Valores de h_{nc}/P para $0.5 \leq P \leq 20$
 $0 \leq f < 1$

Tabla 3: Valores de h_{np}/P para $0 \leq \phi_r \leq 45$
 $0 \leq f < 1$

Gráfico N° 1: f vs. h_{nc}/P , h_{np}/P (curvas $P = cte$, $\phi_r = cte$)

Con estas ayudas es posible evaluar rápidamente las alturas críticas y la menor de las dos será la dominante.

TABLA 4

ACELERACION MAXIMA PARA B(α) ≤ 90

$$\alpha = \cos(\beta) / \sin(\beta R)$$

FR	2	4	6	8	10	12	14	16	18
B-FR									
0	28.6363	14.3007	9.5144	7.1154	5.6713	4.7046	4.0108	3.4874	3.0777
5	28.4401	14.1591	9.391	7.0011	5.5625	4.5996	3.9084	3.387	2.9788
10	28.0276	13.9098	9.1962	6.8336	5.4115	4.4595	3.7762	3.2608	2.8573
15	27.4017	13.5546	8.9314	6.6141	5.2192	4.2855	3.6153	3.1098	2.714
20	26.5673	13.0962	8.5986	6.3442	4.9872	4.0789	3.4269	2.9351	2.5501
25	25.5306	12.5382	8.2003	6.0261	4.7173	3.8412	3.2124	2.7381	2.3667
30	24.2997	11.8847	7.7397	5.6621	4.4115	3.5743	2.9734	2.5202	2.1654
35	22.8839	11.1408	7.2201	5.255	4.0721	3.2802	2.7119	2.2831	1.9475
40	21.2939	10.3122	6.6456	4.8079	3.7017	2.9612	2.4296	2.0287	1.7149
45	19.5418	9.405	6.0206	4.3242	3.3031	2.6196	2.1289	1.7589	1.4691
50	17.641	8.4262	5.3497	3.8076	2.8794	2.258	1.812	1.4756	1.2123
55	15.6059	7.3834	4.6381	3.2621	2.4338	1.8793	1.4813	1.1811	0.9461
60	13.4521	6.2843	3.8912	2.6917	1.9696	1.4863	1.1394	0.8777	0.6728
65	11.1959	5.1374	3.1146	2.1008	1.4905	1.082	0.7887	0.5675	0.3944
70	8.8545	3.9514	2.3144	1.4939	1	0.6694	0.4321	0.2531	0.1129
75	6.4457	2.7354	1.4966	0.8757	0.5019	0.2517	0.0721	-0.0633	-0.1694
80	3.9878	1.4985	0.6673	0.2508	0	-0.1679	-0.2883	-0.3792	-0.4504
85	1.4996	0.2502	-0.167	-0.376	-0.5019	-0.5862	-0.6466	-0.6922	-0.728
89	-0.5001	-0.7503	-0.8338	-0.8757	-0.9009	-0.9177	-0.9298	-0.939	-0.9461

FR	20	22	24	26	28	30	35	40	45
B-FR									
0	2.7475	2.4751	2.246	2.0503	1.8807	1.7321	1.4281	1.1918	1
5	2.6499	2.3785	2.1503	1.9553	1.7864	1.6383	1.3356	1.1001	0.909
10	2.5321	2.2638	2.0383	1.8455	1.6785	1.5321	1.2328	1	0.8112
15	2.395	2.1319	1.9107	1.7216	1.5578	1.4142	1.1207	0.8923	0.7071
20	2.2398	1.9838	1.7686	1.5846	1.4253	1.2856	1	0.7779	0.5977
25	2.0674	1.8206	1.613	1.4356	1.2819	1.1472	0.8717	0.6575	0.4837
30	1.8794	1.6435	1.4451	1.2756	1.1288	1	0.7368	0.5321	0.366
35	1.677	1.4539	1.2663	1.1059	0.967	0.8452	0.5963	0.4027	0.2456
40	1.4619	1.2532	1.0778	0.9278	0.7979	0.684	0.4512	0.2701	0.1233
45	1.2357	1.043	0.8811	0.7427	0.6228	0.5176	0.3027	0.1356	0
50	1	0.8249	0.6777	0.5519	0.4429	0.3473	0.152	0	-0.1233
55	0.7567	0.6005	0.4691	0.3569	0.2596	0.1743	0	-0.1356	-0.2456
60	0.5077	0.3715	0.257	0.1591	0.0743	0	-0.1519	-0.2701	-0.366
65	0.2548	0.1397	0.0429	-0.0398	-0.1115	-0.1743	-0.3027	-0.4026	-0.4837
70	0	-0.0932	-0.1715	-0.2384	-0.2964	-0.3473	-0.4512	-0.5321	-0.5977
75	-0.2548	-0.3253	-0.3846	-0.4353	-0.4792	-0.5176	-0.5963	-0.6575	-0.7071
80	-0.5077	-0.555	-0.5948	-0.6288	-0.6582	-0.684	-0.7368	-0.7779	-0.8112
85	-0.7567	-0.7805	-0.8004	-0.8175	-0.8323	-0.8452	-0.8717	-0.8923	-0.909
89	-0.9519	-0.9567	-0.9606	-0.9641	-0.967	-0.9696	-0.9749	-0.979	-0.9824

Condición con sismo

A) Condiciones pseudoestáticas

— Aceleración resultante

$$\alpha_R = \sqrt{1 + \alpha^2 + 2\alpha \sin i} \quad (6)$$

— Angulo de talud

$$\beta_\alpha = \arctan \left(\frac{\sin \beta + \alpha \cos(\beta - i)}{\cos \beta - \alpha \sin(\beta - i)} \right) \quad (7)$$

para $\beta_\alpha < \pi/2$

$$\alpha < \alpha_{crit} = \frac{\cos \beta}{\sin(\beta - i)} \quad (8)$$

— Altura del talud

$$H_\alpha = H/\alpha_r \left(1 + \alpha \frac{\cos(\beta - i)}{\sin \beta} \right) \quad (9)$$

— Peso unitario

$$\gamma_d = \gamma \alpha_r \quad (10)$$

— Esfuerzo nominal

$$\gamma_\alpha H_\alpha = \gamma H \left[1 + \frac{\alpha \cos(\beta - i)}{\sin \beta} \right] \quad (11)$$

TABLA 5

FACTOR DE CORRECCION DE LA ALTURA NORMALIZADA PARA SISMO (s)

$$S=1/(1+(A/\sin(\beta-\phi_r)))$$

A	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45
B- ϕ_r									
5	0.6355	0.4657	0.3675	0.3035	0.2595	0.2251	0.1994	0.1789	0.1623
10	0.7764	0.6246	0.5365	0.4647	0.4099	0.3666	0.3316	0.3027	0.2784
15	0.8381	0.7213	0.6331	0.5641	0.5087	0.4632	0.4251	0.3929	0.3651
20	0.8725	0.7738	0.6951	0.631	0.5777	0.5327	0.4942	0.4609	0.4318
25	0.8942	0.8087	0.738	0.6788	0.6293	0.5848	0.547	0.5137	0.4843
30	0.9091	0.8333	0.7692	0.7143	0.6667	0.625	0.5882	0.5556	0.5263
35	0.9198	0.8515	0.7927	0.7415	0.6964	0.6566	0.621	0.5891	0.5604
40	0.9278	0.8654	0.8108	0.7627	0.72	0.6818	0.6475	0.6164	0.5882
45	0.934	0.8761	0.825	0.7795	0.7386	0.7021	0.6689	0.6387	0.6111
50	0.9387	0.8845	0.8363	0.793	0.7539	0.7186	0.6864	0.657	0.6299
55	0.9425	0.8912	0.8452	0.8038	0.7662	0.7319	0.7006	0.6719	0.6454
60	0.9454	0.8965	0.8524	0.8124	0.776	0.7427	0.7122	0.6841	0.6581
65	0.9477	0.9006	0.858	0.8192	0.7838	0.7513	0.7214	0.6938	0.6682
70	0.9495	0.9038	0.8623	0.8245	0.7899	0.758	0.7286	0.7014	0.6762
75	0.9508	0.9062	0.8656	0.8285	0.7944	0.763	0.734	0.7072	0.6822
80	0.9517	0.9078	0.8679	0.8312	0.7975	0.7665	0.7378	0.7112	0.6864
85	0.9522	0.9088	0.8691	0.8328	0.7994	0.7686	0.74	0.7135	0.6888
90	0.9524	0.9091	0.8696	0.8333	0.8	0.7692	0.7407	0.7143	0.6897
ϕ_r	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9
5	0.1484	0.1368	0.1263	0.1182	0.1107	0.1041	0.0982	0.093	0.0883
10	0.2579	0.24	0.2245	0.2108	0.1988	0.188	0.1783	0.1696	0.1617
15	0.3411	0.32	0.3014	0.2848	0.2699	0.2566	0.2444	0.2334	0.2233
20	0.4062	0.3834	0.3631	0.3448	0.3282	0.3132	0.2995	0.2869	0.2754
25	0.4581	0.4345	0.4133	0.394	0.3765	0.3604	0.3457	0.3321	0.3195
30	0.5	0.4762	0.4545	0.4348	0.4167	0.4	0.3846	0.3704	0.3571
35	0.5242	0.5005	0.4807	0.4628	0.4504	0.4334	0.4176	0.4029	0.3892
40	0.5425	0.5189	0.5172	0.4972	0.4787	0.4615	0.4455	0.4306	0.4166
45	0.5558	0.5325	0.51	0.521	0.5025	0.4853	0.4692	0.4541	0.44
50	0.5651	0.5421	0.5202	0.51	0.5225	0.5053	0.4892	0.474	0.4598
55	0.571	0.5483	0.5272	0.5176	0.5092	0.522	0.5059	0.4908	0.4765
60	0.574	0.5516	0.5307	0.5212	0.513	0.5259	0.5198	0.5047	0.4904
65	0.5745	0.5523	0.5317	0.5233	0.5162	0.5292	0.5232	0.516	0.5017
70	0.5727	0.5508	0.5305	0.5211	0.5141	0.5271	0.5211	0.514	0.5008
75	0.5687	0.5472	0.5272	0.5179	0.511	0.5241	0.5181	0.511	0.5008
80	0.5633	0.5421	0.5224	0.5134	0.5065	0.5195	0.5135	0.5067	0.5008
85	0.5565	0.5356	0.5162	0.5074	0.5005	0.5135	0.5075	0.5008	0.5008
90	0.5487	0.5282	0.509	0.5004	0.4935	0.5065	0.5005	0.4938	0.5008

en máximo para $\beta = i$ (Newmark)

$$\gamma_{\alpha} H_{\alpha} \max = \gamma H (1 + (\alpha / \sin \beta)) \quad (12)$$

B) Caso I: $\beta_{\alpha} < \pi/2$

En este caso para que existan esfuerzos compresivos simples

$$i_{crit} = \beta - \phi_r \quad (13)$$

$$\sin(\phi_r - \beta) \leq \alpha < \cos \beta / \sin \phi_r \quad (14)$$

B-1) Falla por compresión simple

$$hnc_{\alpha} = \frac{1}{1-f + (\alpha / \sin \beta \cos \phi_r)} \quad (15)$$

B-2) Falla por pandeo simple

$$hnp_{\alpha} = \frac{P \sin^2 \beta}{1-f + (\alpha / \sin \beta \cos \phi_r)} \quad (16)$$

B-3) Factor de corrección por sismo

Para $0 \leq f < 1$; $0 < \alpha \cos \beta / \sin \phi_r$,

$$S = \frac{hnc_{\alpha}}{hnc} \frac{hnp_{\alpha}}{hnp} = \frac{1}{1 + (\alpha / \sin(\beta - \phi_r))} \quad (17)$$

Para $\beta < \phi_r$, se deben usar las fórmulas (15 y 16)

También en pandeo

$$m_{crit \alpha} = \frac{m_{crit}}{\sqrt{S}} \quad (18)$$

B-4) Discriminación de modos de falla

Se conservan los criterios de 4.1. c) (Ec. 5)

B-5) Ayudas de cálculo

Tabla 4: Valores de α_{crit} para $0 \leq (\beta - \phi_r) \leq 90^{\circ}$
 $2^{\circ} \leq \phi_r \leq 45^{\circ}$

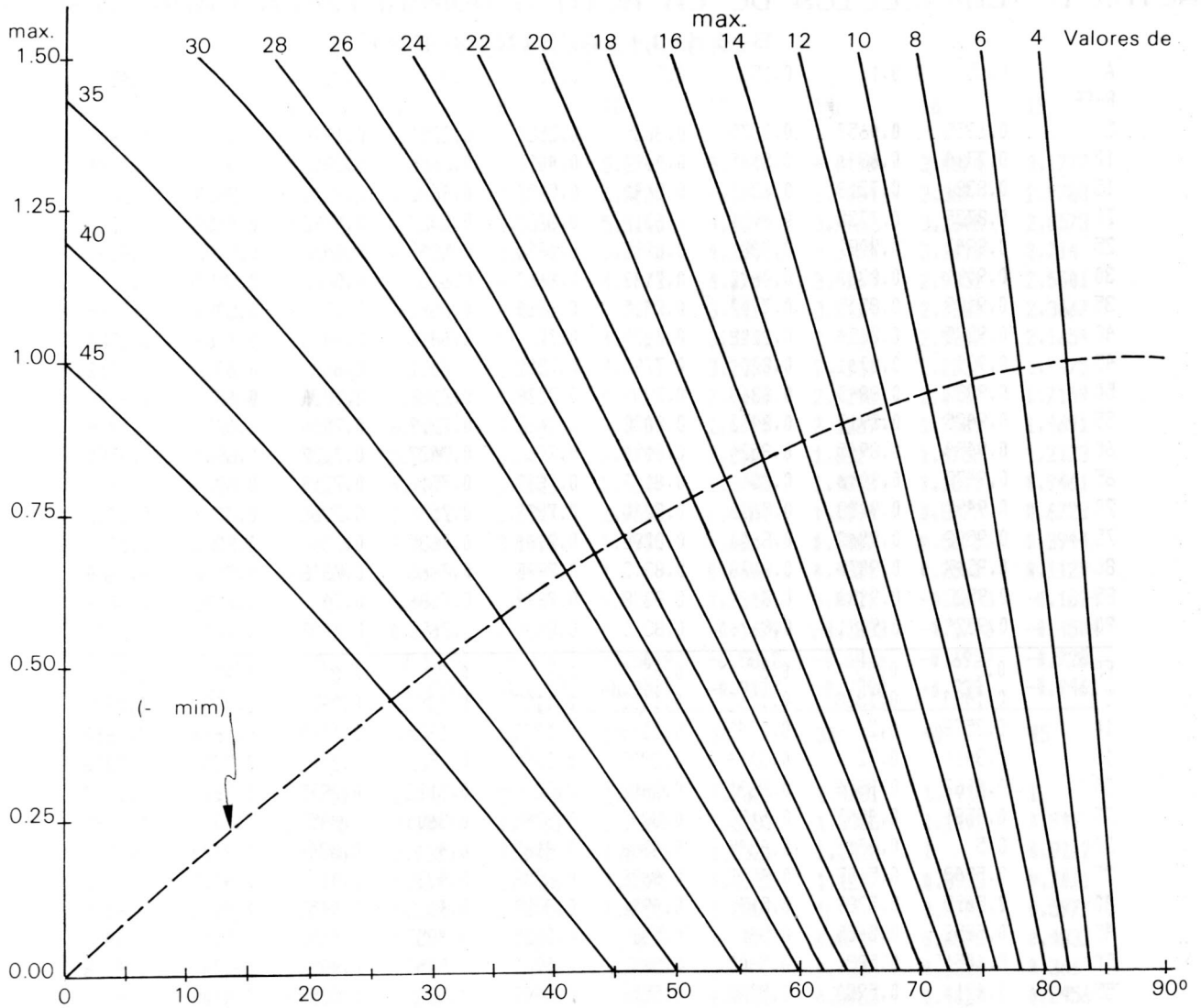


GRAFICO 2. Condición de aceleración para esfuerzo compresivo simple.

Tabla 5: Valores de S para $5^\circ \leq \beta - \phi_r \leq 90^\circ$
 $0.05 \leq \alpha \leq 0.9$

Gráfico 2: $\beta - \phi_r$ vs α_{crit}
 vs $(-\alpha_{min})$
 (Curvas $\phi_r = cte$)

Gráfico 3: $\beta - \phi_r$ vs S (curvas $\alpha = cte$)

Con esas ayudas y los valores de α se evalúan los efectos de sismo para esfuerzos compresivos simples:

$$h n_\alpha = S \cdot h n \quad (19)$$

C) Caso II: $\beta \alpha > \pi/2$

Para este caso hay flexión y

$$\alpha_{crit)min} = \cos \beta \text{ (Gráfico 4)} \quad (20)$$

para $i = \beta - \pi/2$

(aceleración normal al talud) (20a)

C-1) Falla por flexo-compresión

Si
$$\lambda = t/3L = \frac{m \sin \beta}{3} \quad (21)$$

— Esfuerzo compresivo máximo

$$\frac{\sigma_M}{\gamma H)_{max}} = 1 + \frac{\alpha \sqrt{1 + \lambda^2}}{\lambda \sin \beta} - \frac{\cot \beta}{\lambda} \quad (22)$$

$$\text{y ocurre para } i = \beta \arctan(1/\lambda) \quad (23)$$

— Esfuerzo compresivo mínimo

$$\frac{\sigma_M}{\gamma H)_{min}} = 1 - \frac{\alpha \sqrt{1 + \lambda^2}}{\lambda \sin \beta} - \frac{\cot \beta}{\lambda} \quad (24)$$

$$\text{y ocurre para } i = \beta + \arctan(1/\lambda) - \pi \quad (25)$$

Para que se presente tracción

$$\alpha > \alpha_{crit)min} = \frac{\cos \beta + \lambda \sin \beta}{\sqrt{1 + \lambda^2}} \text{ (Gráfico 4)} \quad (26)$$

y en ambos casos ($\sigma_M \sigma_m$) para que $\beta \alpha > \pi/2$

$$\alpha_{min} = \cos \beta \sqrt{1 + \lambda^2} \quad (27)$$

— Esfuerzo cortante máximo

$$\frac{\tau}{\gamma H)_{max}} = - \frac{\alpha - \cos \beta}{\sin \beta} \quad (28)$$

independiente de m.
 y ocurre para $i = \pi/2 - \beta$ (20a)

Para esta condición

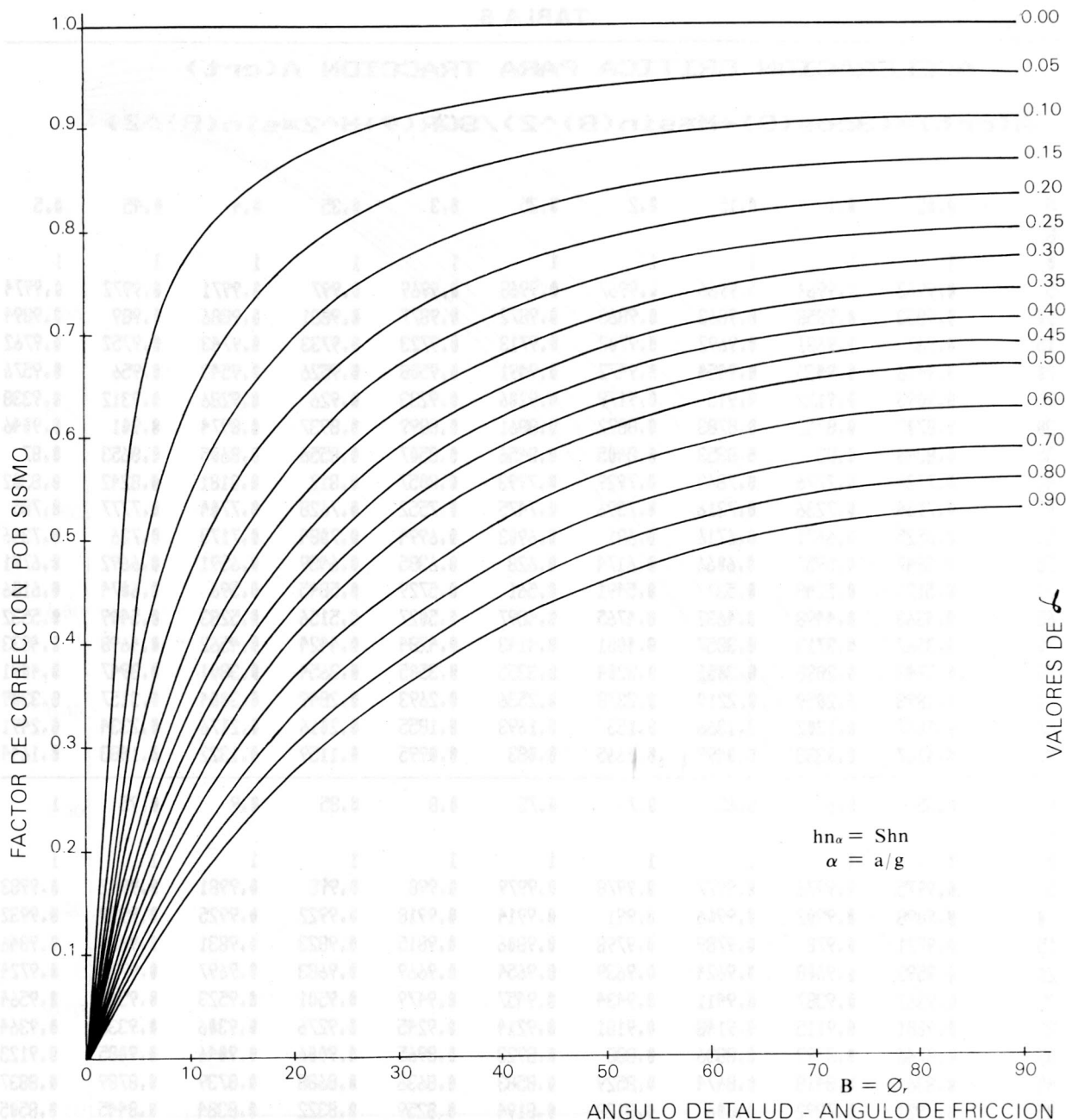


GRAFICO 3. Factor de corrección por sismo (S) para altura normalizada (hn)

$$\frac{\sigma_{Min}}{\gamma H} = 1 \pm \alpha \frac{\cos \beta}{\lambda \sin \beta} \quad (30)$$

Para que ocurra tracción

$$\alpha_{crit} = \cos \beta + \lambda \sin \beta \quad (31)$$

y para $\beta_\alpha > \pi/2$

$$\alpha_{min} = \cos \beta \quad (19)$$

Como en la práctica λ es muy pequeño, las condiciones críticas pueden asimilarse (sin mucho error) a las de cortante máximo, lo cual simplifica enormemente los cálculos.

Además el estado de esfuerzos implica que el esfuerzo compresivo en el sentido transversal es casi nulo y entonces la condición de falla por flexo-compresión puede aproximarse por la condición más crítica de:

$$\sim \sigma_M \geq \sigma_c \quad (32)$$

$$\sim |\tau| \geq \tau_0 \quad (33)$$

en la cual τ_0 es la resistencia para $\sigma = 0$ y depende de la envolvente de falla.

Se acepta Griffith-Hoek

$$\tau_0 = 2\sigma_t = 2 \frac{\sigma_c}{n} \quad (34)$$

$$n = \frac{\sigma_c}{\sigma_t} \quad (34a)$$

resulta para $n > 2\lambda$ lo cual sería lo esperado en este tipo de problemas, prima la falla por compresión y entonces la condición crítica aproximada sería

$$hn\lambda \approx \frac{1}{1 + \frac{\alpha \cos \beta}{\lambda \sin \beta}} \quad (35)$$

TABLA 6

ACELERACION CRITICA PARA TRACCION A(crt)

$$A(crt) = (3\cos(B) + M \sin(B)^2) / \text{SQRT}(9 + M^2 \sin(B)^2)$$

M	0.05	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35	0.4	0.45	0.5
B										
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0.9963	0.9964	0.9966	0.9967	0.9968	0.9969	0.997	0.9971	0.9972	0.9974
10	0.9853	0.9858	0.9863	0.9868	0.9872	0.9877	0.9881	0.9886	0.989	0.9894
15	0.967	0.9681	0.9692	0.9702	0.9713	0.9723	0.9733	0.9743	0.9752	0.9762
20	0.9416	0.9435	0.9454	0.9472	0.9491	0.9508	0.9526	0.9543	0.956	0.9576
25	0.9093	0.9122	0.915	0.9179	0.9206	0.9233	0.926	0.9286	0.9312	0.9338
30	0.8702	0.8742	0.8783	0.8822	0.8861	0.8899	0.8937	0.8974	0.901	0.9046
35	0.8246	0.83	0.8353	0.8405	0.8456	0.8507	0.8556	0.8605	0.8653	0.87
40	0.7729	0.7796	0.7863	0.7929	0.7993	0.8057	0.812	0.8181	0.8242	0.8302
45	0.7154	0.7236	0.7316	0.7396	0.7475	0.7552	0.7628	0.7704	0.7777	0.785
50	0.6525	0.6621	0.6716	0.681	0.6903	0.6994	0.7084	0.7173	0.726	0.7346
55	0.5847	0.5957	0.6066	0.6174	0.628	0.6385	0.6489	0.6591	0.6692	0.6791
60	0.5124	0.5248	0.537	0.5491	0.561	0.5729	0.5845	0.596	0.6074	0.6186
65	0.4363	0.4498	0.4632	0.4765	0.4897	0.5027	0.5156	0.5283	0.5409	0.5532
70	0.3567	0.3713	0.3857	0.4001	0.4143	0.4284	0.4424	0.4562	0.4698	0.4833
75	0.2743	0.2898	0.3051	0.3204	0.3355	0.3505	0.3654	0.3801	0.3947	0.4091
80	0.1898	0.2059	0.2219	0.2378	0.2536	0.2693	0.2849	0.3004	0.3157	0.3309
85	0.1037	0.1202	0.1366	0.153	0.1693	0.1855	0.2016	0.2176	0.2334	0.2491
90	0.0167	0.0333	0.0499	0.0665	0.083	0.0995	0.1159	0.1322	0.1483	0.1644

M	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75	0.8	0.85	0.9	0.95	1
B										
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0.9975	0.9976	0.9977	0.9978	0.9979	0.998	0.998	0.9981	0.9982	0.9983
10	0.9898	0.9902	0.9906	0.991	0.9914	0.9918	0.9922	0.9925	0.9929	0.9932
15	0.9771	0.978	0.9789	0.9798	0.9806	0.9815	0.9823	0.9831	0.9838	0.9846
20	0.9593	0.9608	0.9624	0.9639	0.9654	0.9669	0.9683	0.9697	0.9711	0.9724
25	0.9362	0.9387	0.9411	0.9434	0.9457	0.9479	0.9501	0.9523	0.9544	0.9564
30	0.9081	0.9115	0.9148	0.9181	0.9214	0.9245	0.9276	0.9306	0.9336	0.9364
35	0.8746	0.8792	0.8836	0.888	0.8923	0.8965	0.9006	0.9046	0.9085	0.9123
40	0.836	0.8418	0.8474	0.8529	0.8583	0.8636	0.8688	0.8739	0.8789	0.8837
45	0.7921	0.7992	0.806	0.8128	0.8194	0.8259	0.8322	0.8384	0.8445	0.8505
50	0.7431	0.7514	0.7595	0.7675	0.7754	0.7831	0.7906	0.798	0.8053	0.8123
55	0.6889	0.6985	0.7079	0.7172	0.7263	0.7352	0.7439	0.7525	0.7609	0.7691
60	0.6296	0.6405	0.6511	0.6616	0.6719	0.682	0.692	0.7017	0.7112	0.7206
65	0.5655	0.5775	0.5893	0.601	0.6124	0.6237	0.6348	0.6456	0.6562	0.6667
70	0.4966	0.5097	0.5226	0.5353	0.5479	0.5602	0.5723	0.5842	0.5958	0.6073
75	0.4233	0.4373	0.4512	0.4649	0.4783	0.4916	0.5046	0.5174	0.53	0.5424
80	0.3459	0.3607	0.3753	0.3898	0.404	0.4181	0.4319	0.4456	0.459	0.4721
85	0.2647	0.2801	0.2954	0.3104	0.3253	0.34	0.3545	0.3688	0.3828	0.3967
90	0.1803	0.1961	0.2118	0.2272	0.2425	0.2577	0.2726	0.2873	0.3019	0.3162

No elaboramos más en este aspecto pues en rigor los resultados de los análisis de esfuerzos deben compararse, por medio de círculos de Mohr, con la envolvente de resistencia del material rocoso involucrado en el problema. Lo que sí es de esperar es que prime la compresión (o tracción) sobre el esfuerzo tangencial.

C-2) Ayudas de cálculo

Tabla N° 6: Valores de α_{crit} tracción para

$$0 < \beta < 90^\circ$$

$$0.05 < m < 1$$

Gráfico N° 4 β vs. α_{crit} tracción (curvas $m = cte$)

No se dan tablas ni gráficos para flexión por lo dicho anteriormente.

CONCLUSION

Se presentan ayudas de cálculo y condiciones críticas para evaluar principalmente fallas planares de compresión y pandeo simples en taludes

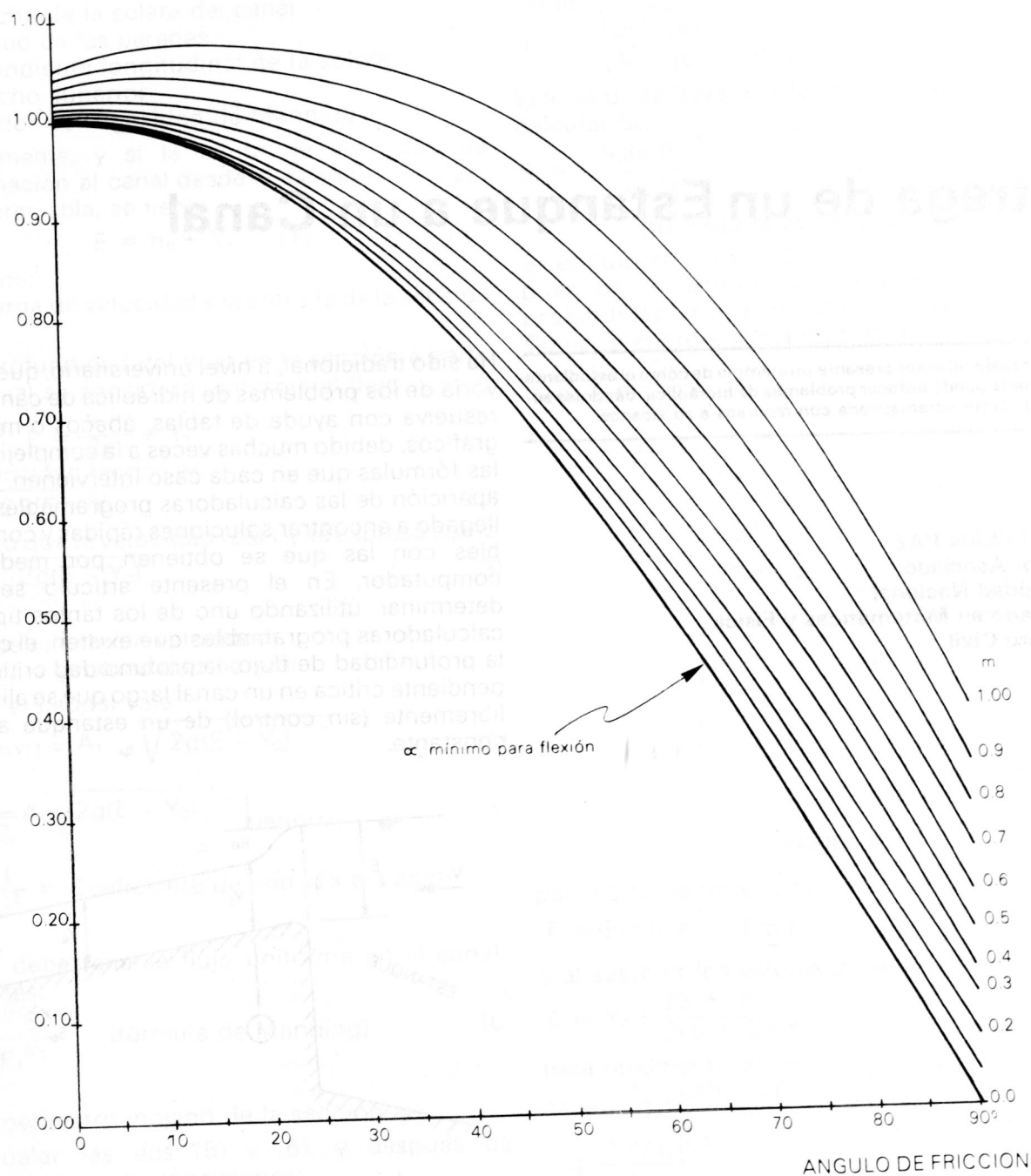


GRAFICO 4. Aceleración crítica para tracción.

secos cinemáticamente estables. Se espera que sean de utilidad en la práctica y en próximo artículo se considerarán los taludes con agua.

El autor agradece la colaboración del personal de Ingeniería e Hidrosistemas para la elaboración de estos trabajos, en especial a las señoritas Yazmín Sáchica y Gisella Parra, respectivamente

por la mecanografía y el procesamiento en computador en el Centro de Cálculo de IEH, lo mismo a los señores Jaime León, Luis M. Barrios y G. Sánchez por los dibujos. Los colegas R. Alvarez y F. Arévalo colaboraron con comentarios y sugerencias.

REFERENCIAS

1. Julivert, M. El papel de la gravedad y la erosión en las estructuras del borde oriental de la Sabana de Bogotá —Boletín UIS— Nº 8, 1961. pp. 5-20.
2. Julivert, M. La estratigrafía de la formación Guadalupe y las estructuras de gravedad en la Sierra de Chía —Boletín de Geología UIS Nº 11. 1962. pp. 5-21.
3. Hoek & Bray. Rock Slope Engineering —IMM. Londres, 1974.