

Cálculo de deformaciones por peso propio de la cortina del Proyecto Hidroeléctrico
La Yesca

Dr. Rigoberto Rivera C.
 Dr. Humberto Marengo M.

Para llevar a cabo este cálculo es necesario tomar en cuenta el procedimiento constructivo de campo y las características de los materiales compactados.

En una análisis simplista, se supondrá que los materiales son elásticos lineales representados por sus constantes elásticas: módulo de elasticidad E y relación de Poisson v.

La deformación que se genera en una esquina de un área uniformemente cargada apoyada sobre un medio elástico lineal formado por “n” capas se puede calcular mediante la expresión propuesta por Steinbrener:

$$\delta_z = \delta_{z_1}(E_1, \nu_1) + [\delta_{z_2}(E_2, \nu_2) - \delta_{z_1}(E_2, \nu_2)] + \dots + [\delta_{z_n}(E_n, \nu_n) - \delta_{z_{n-1}}(E_n, \nu_n)] \quad (1)$$

Donde δ_{z_n} está dado por:

$$\delta_{z_n} = \frac{qB}{E_n} [(1 - \nu_n^2)F_1 + (1 - \nu_n - 2\nu_n^2)F_2] \quad (2)$$

Siendo F_1 y F_2 dos factores de forma que son función de las relaciones z_n/B y de L/B .

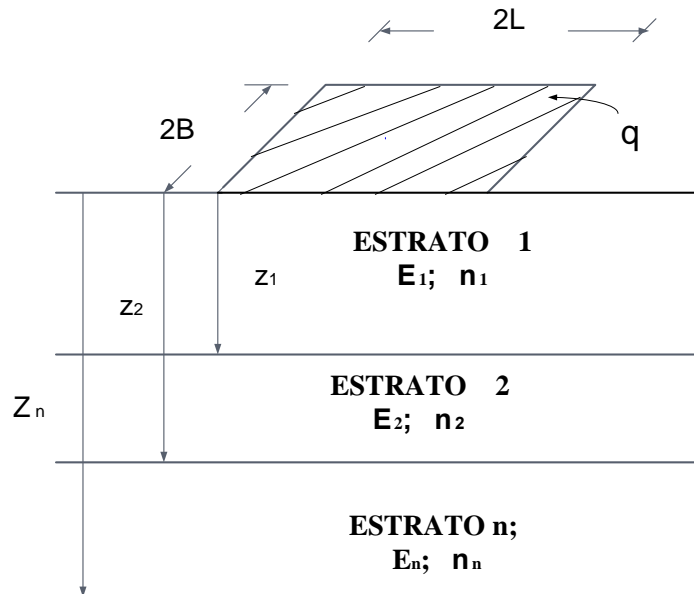


Fig. 1 Cálculo de deformaciones inmediatas empleando el criterio de Steinbrener

Para calcular el hundimiento en el centro del área, simplemente se toma la cuarta parte del área real y los resultados se multiplican por 4, ya que se trata de un método lineal.

Para la sección de una presa de enrocamiento, este cálculo se puede llevar a cabo como se ilustra en la figura siguiente.

El hundimiento que provoca la primera capa de espesor d_1 es igual a:

$$\delta_{d_o} = \frac{\gamma_1 d_1 B}{E_o} [(1 - \nu_o^2)F_1 + (1 - \nu_o - 2\nu_o^2)F_2] \quad (3)$$

El hundimiento que provoca la segunda capa resulta:

$$\delta_{d_1+d_o} = \delta_{d_1}(E_1, \nu_1) + \delta_{d_1+d_o}(E_o, \nu_o) - \delta_{d_1}(E_o, \nu_o) \quad (4)$$

Esta expresión se puede generalizar para todas las capas de la cortina y de esta manera evaluar el hundimiento acumulado total.

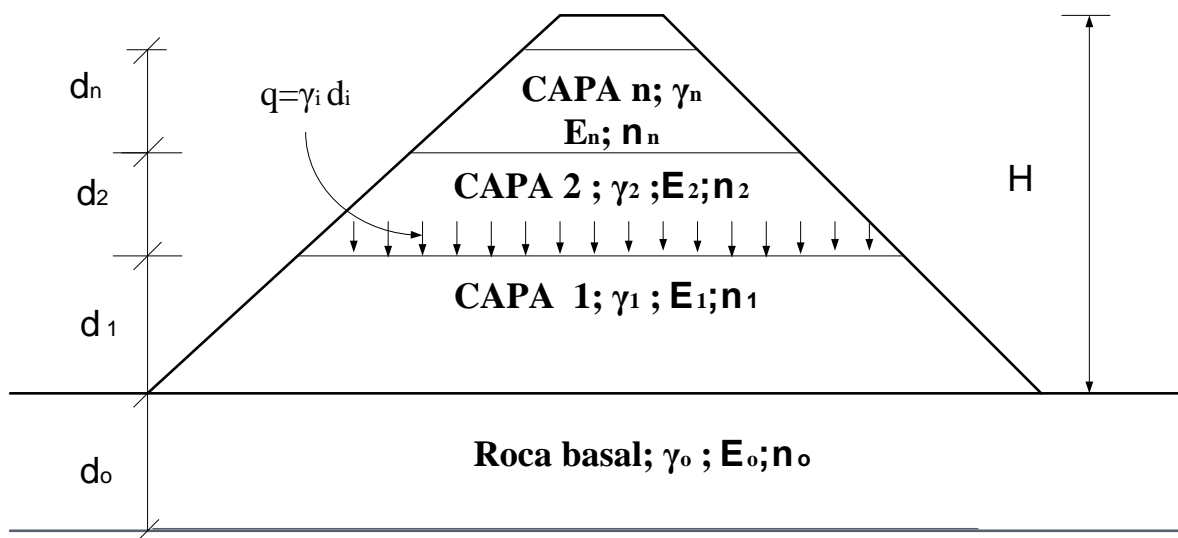


Fig. 2 Cálculo de deformaciones inmediatas en la cortina

Cálculo aproximado

De acuerdo con la ley de Hooke se tiene:

$$\Delta H = \frac{\sigma}{E} H \quad (5)$$

siendo σ el esfuerzo normal actuante, E el módulo de deformación y H el espesor del estrato deformable.

Las propiedades índices de los materiales compactados de la cortina de la Presa La Yesca, se reportan en la siguiente tabla.

Material	Peso volumétrico $\gamma_m(\text{kN/m}^3)$	Relación de vacíos e
3	22.65	0.16
3B	22.13	0.18
T	20.34	0.27
3C	19.79	0.30
Valores promedio	21.23	0.228

RESULTADOS DE CALAS VOLUMÉTRICAS EN CORTINA

Tipo de material	Volumen colocado (m^3)	No. de calas		Peso volumétrico seco promedio (kN/m^3).	Relación de vacíos promedio
		programadas	ejecutadas		(e)
2	280,188	318	351	22.61	0.16
3B Aluvión	2,651,381	133	135	22.04	0.18
3B Enroc. (El. 500)	716,487	36	32	20.24	0.27
T	3,794,640	190	189	20.08	0.28
3C	3,879,261	26	44	19.78	0.29



De acuerdo con Tatsuoka (1975) el módulo de rigidez dinámica ($G_{\text{máx}}$; para niveles de deformaciones menores a 10^{-5}) para gravas compactas y enrocamientos se puede expresar como:

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{7230(2.97 - e)^2}{1 + e} \sigma_c^n \quad (6)$$

siendo e la relación de vacíos, σ_c el esfuerzo de confinamiento (en kPa) y n una constante que depende del nivel de deformaciones al cual se determina el módulo de deformación y de la granulometría del material, en este caso $n=0.38$.

Para nuestro caso consideraremos un esfuerzo de confinamiento medio al centro de la cortina de:

$$\sigma_c = \frac{H}{2} \gamma_m = \left[\frac{200}{2} \right] 2.123 = 212.3 \text{ t/m}^2 \quad (7)$$

El módulo $G_{m\acute{a}x}$ se calcula entonces como:

$$G_{m\acute{a}x} = \frac{7230(2.97-0.228)^2}{1+e} 2123^{0.38} = (8.13)(10^5) \text{ kPa} \quad (8)$$

El modulo de Young se calcula como:

$$E_{m\acute{a}x} = 2(1 + \nu)G_{m\acute{a}x} = 2(1 + 0.3)(8.13 \cdot 10^5) \\ = (21.14)(10^5) \text{ kPa} \quad (9)$$

En condiciones estáticas el módulo de deformación se puede calcular como:

$$E_{est} = 0.5E_{m\acute{a}x} = 0.5(21.14)(10^5) = 10.57 (10^5) \text{ kPa} \quad (10)$$

Considerando $q=(\gamma_m)H=2,123(200)=424.6 \text{ t/m}^2$

El hundimiento inmediato será:

$$\Delta H = \frac{42.46}{10570} 200(10^2) = 80 \text{ cm} \quad (11)$$

El asentamiento esperado es del orden de 80 cm.

Cabe resaltar que este tipo de análisis, por ser elástico lineal, es muy sensible al valor del módulo de deformación. Dichos módulos deben de ser determinados en campo en los materiales ya tendidos y compactados.



Para esquinas se utilizó una retroexcavadora con un accesorio Nippon Pneumatic Kenko (NPK) con placa de acero vibratorio de 1,0 m de ancho por 0,8 m de largo, entregando un impacto equivalente a 12 ton.

Comparativo de asentamiento en presas de CFRDs en el mundo

PRESA	PAÍS	AÑO	TIPO DE MATERIAL	ÁREA DE LA CARA DE CONCRETO (A en m ²)	ALTURA (H en m)	FACTOR DE FORMA (A/H ²)	ASENTAMIENTO MÁXIMO (m)	ASENTAMIENTO MÁXIMO ENTRE LA ALTURA (H)
Itaipu	Brasil	2000	Basalto	110,000	125	7.0	1.30	1.04
Machadinho	Brasil	2004	Basalto	93,000	125	6.0	1.60	1.28
Segredo	Brasil	1993	Basalto	86,000	140	4.4	2.23	1.59
Xingo	Brasil	1994	Granito	135,000	140	6.9	2.90	2.07
Mohale	Lesoto	2003	Basalto	77,000	145	3.7	2.86	1.97
Faz de Areia	Brasil	1980	Basalto	139,000	160	5.4	3.52	2.20
TSQ 1	China	1999	Calizas	181,000	178	5.7	3.32	1.87
Barra Grande	Brasil	2006	Basalto	108,000	185	3.2	3.40	1.84
El Cajón	México	2006	Ignimbrita	113,000	188	3.2	0.85	$.45 \times 10^{-2}$
Campos Novos	Brasil	2006	Basalto	105,000	202	2.6	3.10	1.53
Karahnjúkar	Islandia	2007	Basalto	93,000	150	4.1	1.53	1.02
La Yesca	México	2012	Ignimbrita	93,600	209	2.14	0.84	$.4 \times 10^{-2}$

55

TENDENCIAS ACTUALES DE ZONIFICACIÓN DEL ENROCAMIENTO

- ✓ Utilización del bordillo de concreto extruido para delimitar la cara aguas arriba de la cortina y confinar el material de transición 2 para su compactación
- ✓ Material de respaldo Zona 2 para la recepción de la cara de concreto, diámetro menor que 50,80 mm, compactado en capas no mayores a 0,40 m de espesor. Ancho de 4 a 6 m, el proceso de compactación se debe realizar mediante las pasadas necesarias de rodillo liso vibratorio de 120 kN ($\approx 12 t$) de peso estático en el tambor hasta cumplir con la relación de vacíos identificada en el terraplén de pruebas.
- ✓ Material filtro de protección de junta perimetral 2F, diámetro menor que 38 mm, compactado con rodillo liso vibratorio de 120 kN ($\approx 12 t$) de peso estático en el tambor, en capas de 0,40 m.
- ✓ Zona 3B - enrocamiento, diámetro máximo 0,6 – 0,8 m, en capas de 0,6 - a 0,8 m, compactados con rodillo de 120 kN ($\approx 12 t$), en 6 pasadas con 250 l/m³ de agua en el enrocamiento, en el tercio de aguas arriba de la sección del terraplén.
- ✓ Zona T - Material similar al de la zona 3B, con granulometría de 0,80 – 1,00 m de espesor con características de deformación semejantes, con adición de agua, en zonas delimitada por una inclinación hasta aguas abajo de 0,3:1 a 0,5:1, para reducir la deformación de la cresta de la presa para el embalse en su nivel máximo.
- ✓ Zona 3C. Enrocamiento con tamaño máximo de 1,20 m, compactado en capas de 1,20 – 1,40 m, con seis pasadas de rodillo de 120 kN ($\approx 12 t$), con agua en la misma proporción.