



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA, LIMA, PERU

**CURSO:
ACTUALIZACION PROFESIONAL
DINAMICA DE SUELOS**

**DISEÑO SISMICO DE PRESAS
DE TIERRA Y ENROCADO**

**Jorge E. Alva Hurtado
Miguel Infantes Quijano**

**CENTRO PERUANO JAPONES DE INVESTIGACION SISMICA
Y MITIGACION DE DESASTRES**



CONTENIDO

- **INTRODUCCION**
- **COMPORTAMIENTO DE PRESAS DURANTE SISMOS**
- **ANALISIS PSEUDO-ESTATICO**
- **METODO SIMPLIFICADO DE DEFORMACIONES INDUCIDAS**
- **ANALISIS DE ESTABILIDAD DINAMICO**
- **CASO ESTUDIADO**
- **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

INTRODUCCION

Se ha alcanzado un notable progreso en el entendimiento del comportamiento de las presas de tierra y enrocado sometidas a la acción sísmica.

- Métodos analíticos para calcular la respuesta dinámica de presas.
- Ensayos dinámicos para determinar las propiedades del suelo bajo carga sísmica.
- Métodos de diseño para evaluar la estabilidad sísmica y el potencial de deformación debido a sismos

COMPORTAMIENTO DE PRESAS DURANTE SISMOS

- 1) Cualquier presa bien construida puede soportar sismos moderados, con aceleraciones máximas de 0.2 g, sin daños.**
- 2) Presas de material arcilloso con cimentación arcillosa o rocosa pueden soportar sismos fuertes con magnitudes Richter de 8.25 y aceleraciones máximas de 0.35 a 0.8 g, sin daños aparentes.**
- 3) Presas de enrocado con pantalla de concreto se mantienen secas y son capaces de soportar sismos extremadamente fuertes, con solamente pequeñas deformaciones.**
- 4) El diseño sísmico debe concentrarse en las presas que pueden sufrir daños por sismos severos o tienen cuerpos granulares saturados que pueden perder resistencia durante sismos, ocasionando movimientos.**
- 5) El análisis dinámico se emplea en presas de material granular, saturado y suelto a medianamente denso, sometidas a sismo fuerte o sobre cimentación del mismo tipo. En estos casos se incrementa la presión de poros durante el sismo, generándose pérdida de resistencia. El método pseudo-estático no es aplicable.**

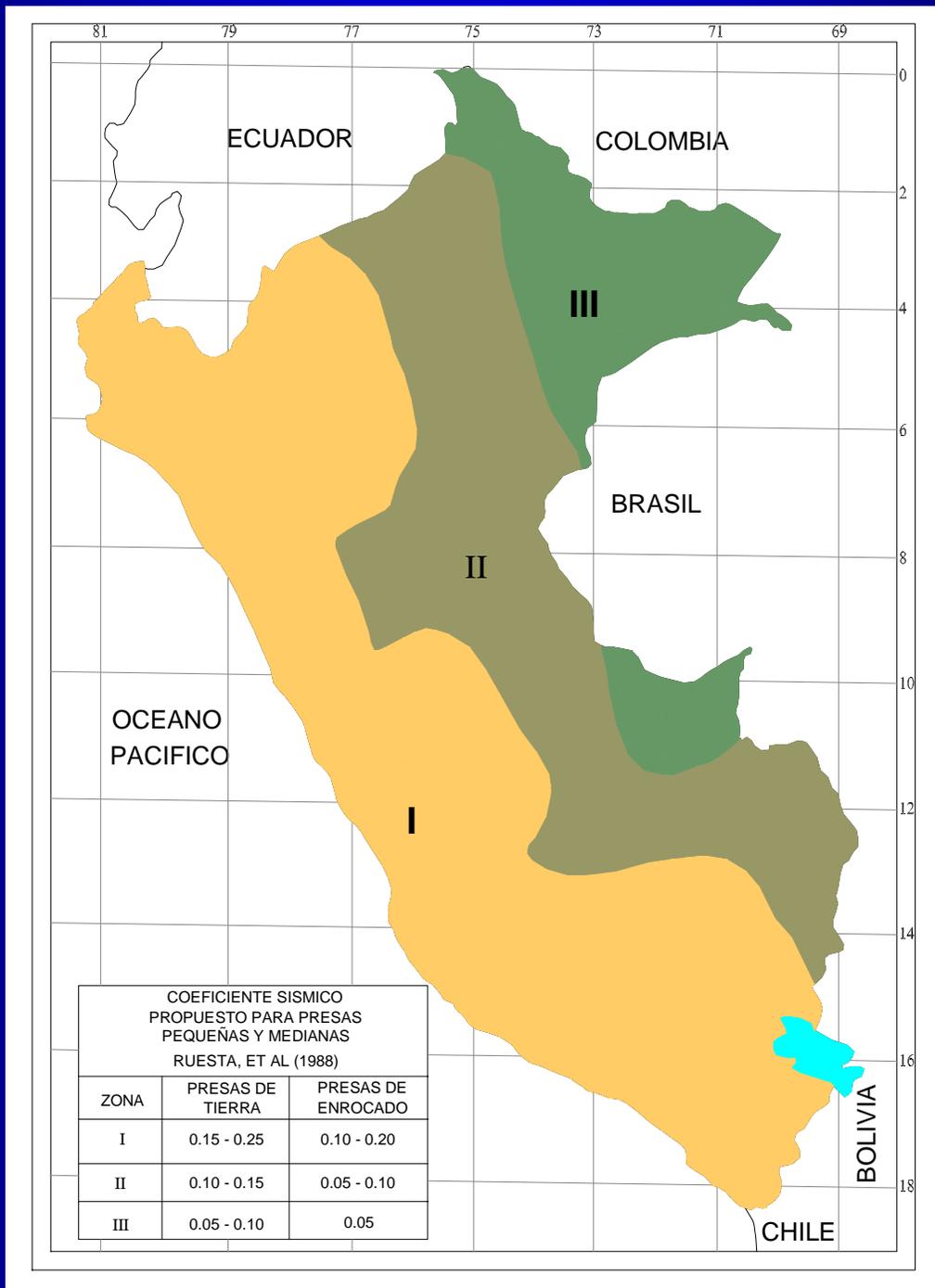
ANALISIS PSEUDO-ESTATICO

- Se utiliza el método de equilibrio límite para el análisis de estabilidad de taludes, adicionando un coeficiente sísmico.
- El coeficiente lateral sísmico es semiempírico, que depende de la sismicidad del país.
- Ruesta, Díaz y Alva (1988) han propuesto valores del coeficiente lateral sísmico para presas de tierra y enrocado en el Perú. Los valores propuestos son consistentes con las presas de tierra y enrocado diseñadas y construidas en el Perú y el mundo.
- El análisis de estabilidad pseudo-estático sirve además para determinar la aceleración de fluencia k_y que se emplea en el método simplificado de deformaciones inducidas.
- En una presa de tierra el análisis de estabilidad de taludes se realiza típicamente para alcanzar los siguientes factores de seguridad.

1) Final de construcción + sismo	FS > 1.0
2) Infiltración constante + sismo	FS > 1.25
3) Desembalse rápido + sismo	FS > 1.0

DISEÑO SISMICO DE PRESAS DE TIERRA Y ENROCADO EN EL PERU (Ruesta, Díaz y Alva, 1988)

PRESA	TIPO	UBICACION		EMBALSE UTIL 10 ⁶ xM ³	COTA CORONAC. M.S.N.M.	ALTURA MAX (M)	SECCION MAXIMA					METODO DE ANALISIS	COEF. SISMICO	AÑO EST.	ESTADO ACTUAL
		Departemento	Latitud				TALUD PROMEDIO		DIMENSIONES (m)						
			Longit.				Aguas Arriba	Aguas Abajo	Corona	Base	Long. Crest.				
POECHOS	Tierra Zonificada	Piura	4° 40'	830	108	48	1:2.25	1:2.25	8	240	600	Por defor- mación	*	1971	Construida
			8° 30'												
TINAJONES	Tierra Zonificada	Lambayeque	6° 40'	300	216	37	1:3.0	1:2.5	9	250	2440	Fellenius	0.25	1965	Construida
			79° 25'												
GALLITO CIEGO	Tierra Zonificada	Cajamarca	7° 14'	400	412	102	1:2.35	1:2.25	15	527	782	Bishop Krey	0.15	1975	Construida
			79° 15'												
PISHCAPACCHA	Tierra Zonificada	Ancash	10° 00'	45	4157	50	1:1.8	1:1.75	8	220	425	Bishop	0.10	1985	Estudio concluido
			77° 10'												
RECRETA	Tierra Zonificada	Ancash	10° 10'	267	4021	48	1:3.5	1:3	12	280	2900	Análisis Dinámico	*	1982	Estudio concluido
			77° 20'												
YURACMAYO	Tierra Zonificada	Lima	11° 45'	44	4318	53	1:2.5	1:2	8	300	580	Deform. Inducidas	*	1984	Construida
			76° 15'												
ANCASCOCHA	Tierra Zonificada	Ayacucho	14° 55'	65	3430	40	1:2.5	1:2	10	215	174	Bishop Quad-4	0.12	1984	En construcción
			73° 50'												
IRURO	Enrocado pantalla de concreto	Ayacucho	14° 30'	59	4065	49	1:1.5	1:1.5	9	173	383	Deform. Inducidas	*	1982	En construcción
			74° 15'												
CONDOROMA	Tierra Zonificada	Arequipa	15° 25'	200	4121	92	1:2.5	1:2.25	12	400	510	Fellenius	0.20	1967	Construida
			71° 20'												
AGUADA BLANCA	Enrocado pantalla de acero	Arequipa	16° 15'	43	3671	45	1:1.7	1:1.7	5	160	70	Cuña Des- lizante	0.15	1972	Construida
			71° 20'												
CHIHUANE	Tierra Zonificada	Puno	16° 10'	237	3880	25	1:2	1:1.75	8	120	177	Bishop	0.15	1986	Estudio concluido
			69° 50'												
PASTO GRANDE	Tierra Zonificada	Moquegua	16° 40'	145	4525	10	1:2.3	1:2	3.5	44	180	Bishop Modificado	0.20	1987	Construida
			70° 35'												
JARUMA	Tierra Zonificada	Tacna	17° 22'	9	4498	22	1:2.5	1:2	8	109	130	Fellenius	0.15	1980	Construida
			69° 57'												
PAUCARANI	Tierra Zonificada	Tacna	17° 40'	5	4543	24	1:2	1:2	8	100	130	Fellenius	0.15	1978	Construida
			69° 50'												

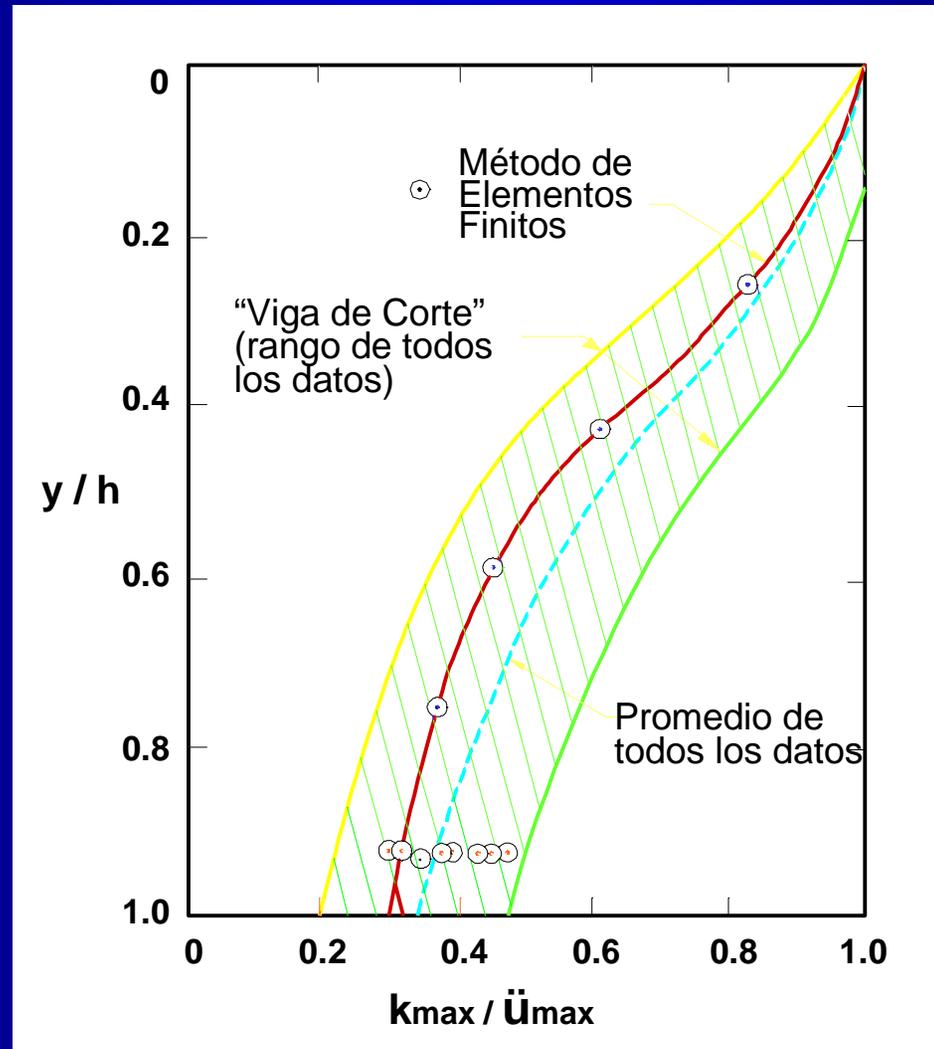


METODO SIMPLIFICADO DE DEFORMACIONES INDUCIDAS

- La deformación permanente se emplea como criterio de diseño.
 - Método racional simple, se aplica a presas constituídas por suelos arcillosos compactos, arenas secas y suelos granulares densos. Poco potencial de desarrollo de presión de poros, deformaciones pequeñas, el material retiene su resistencia estática.
 - Se basa en el cálculo de deformaciones permanentes, con la evaluación de respuesta dinámica.
 - La falla ocurre en una superficie de deslizamiento bien definida con comportamiento elástico hasta la falla y luego comportamiento perfectamente plástico.
 - Propuesto originalmente por Newmark y modificado por Makdisi y Seed.
- 1) Determine la aceleración de fluencia, la que produce $FS = 1.0$.
 - 2) Determine las aceleraciones producidas por el sismo en la presa por respuesta dinámica. Se utiliza el método de elementos finitos o vigas de corte. Tiempo-historia de aceleraciones promedio para varias superficie potenciales de falla.
 - 3) Cuando la aceleración inducida excede la calculada, ocurrirán movimientos; la magnitud se evalúa con doble integración.

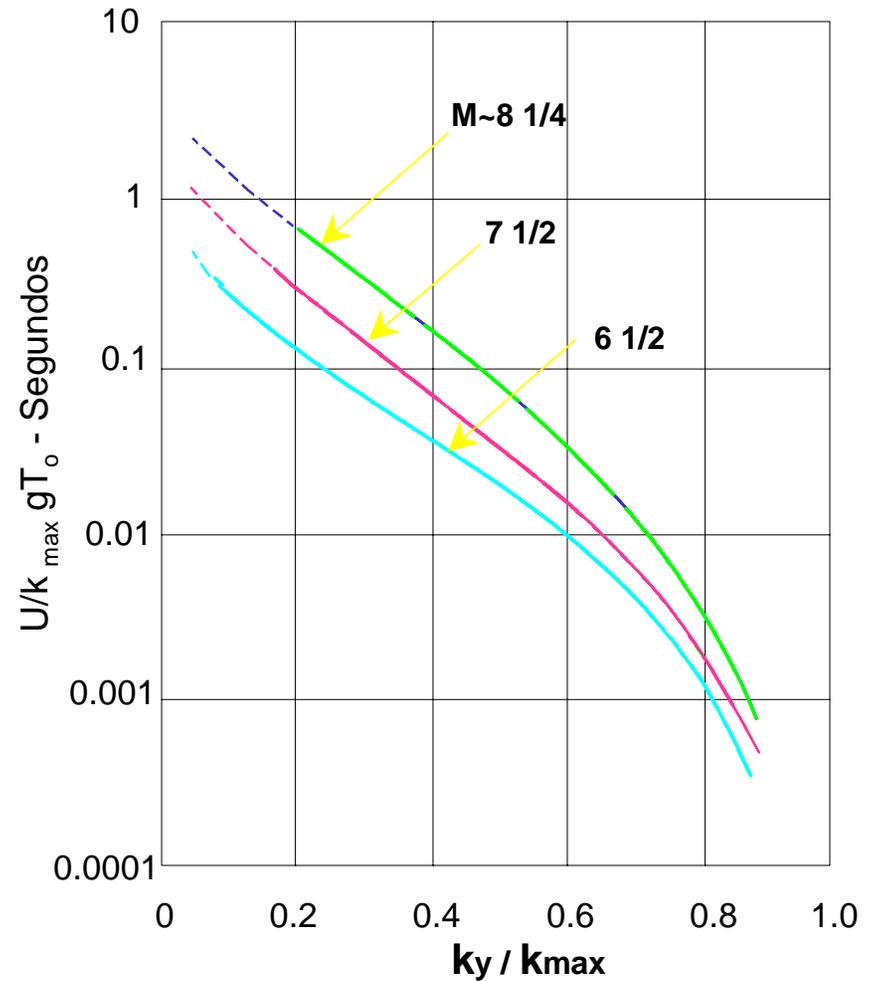
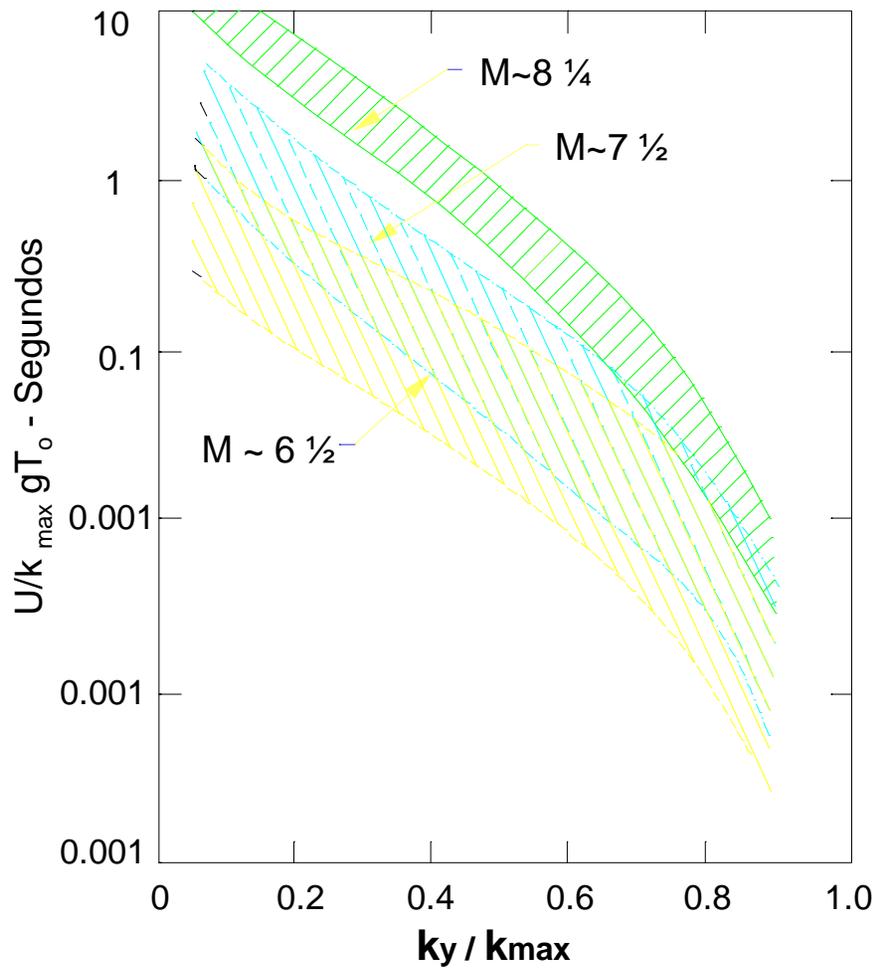
El método se ha aplicado a presas de altura de 30-60 mts., de suelo arcilloso compactado o material granular muy denso.

VARIACION DE LA RELACION DE ACELERACION MAXIMA CON LA PROFUNDIDAD DE LA MASA DESLIZANTE



VARIACION DE DESPLAZAMIENTO PERMANENTE NORMALIZADO CON ACELERACION DE FLUENCIA
RESUMEN DE DATOS

VARIACION DE DESPLAZAMIENTO PROMEDIO NORMALIZADO CON ACELERACION DE FLUENCIA



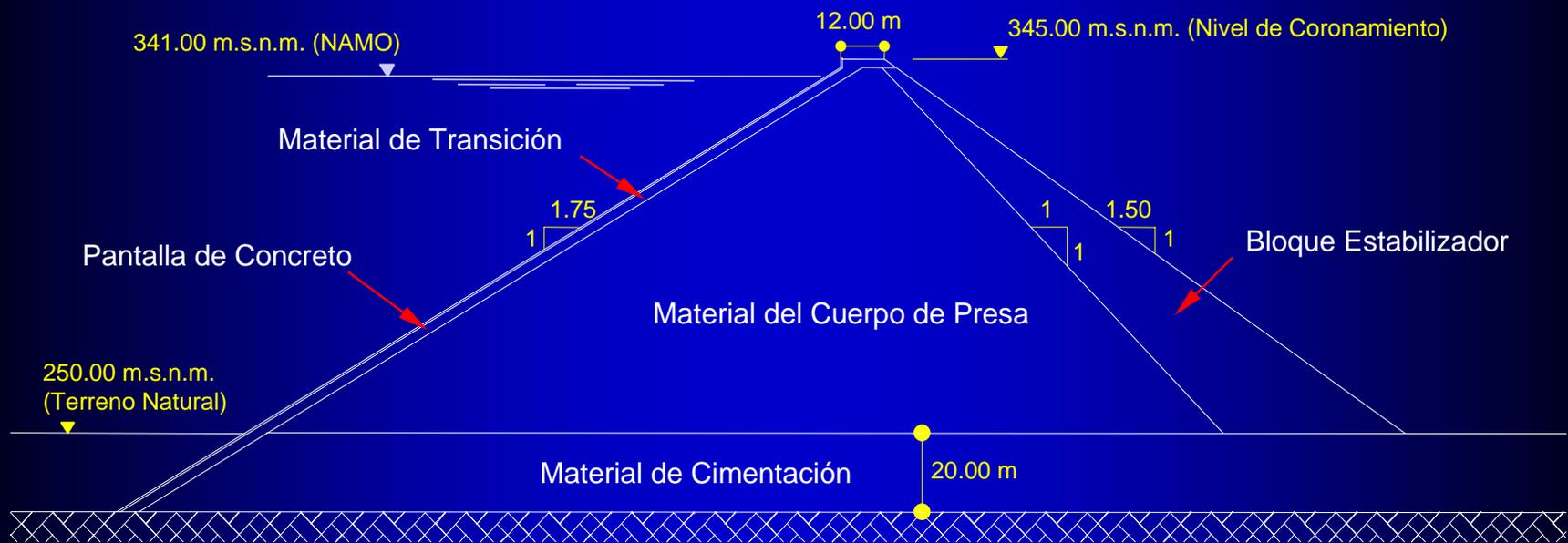
ANALISIS DE ESTABILIDAD DINAMICO

- **Evaluación de Esfuerzo Estáticos**
- **Análisis de Respuesta Sísmica**
- **Procedimiento Recomendado**

CASO ESTUDIADO

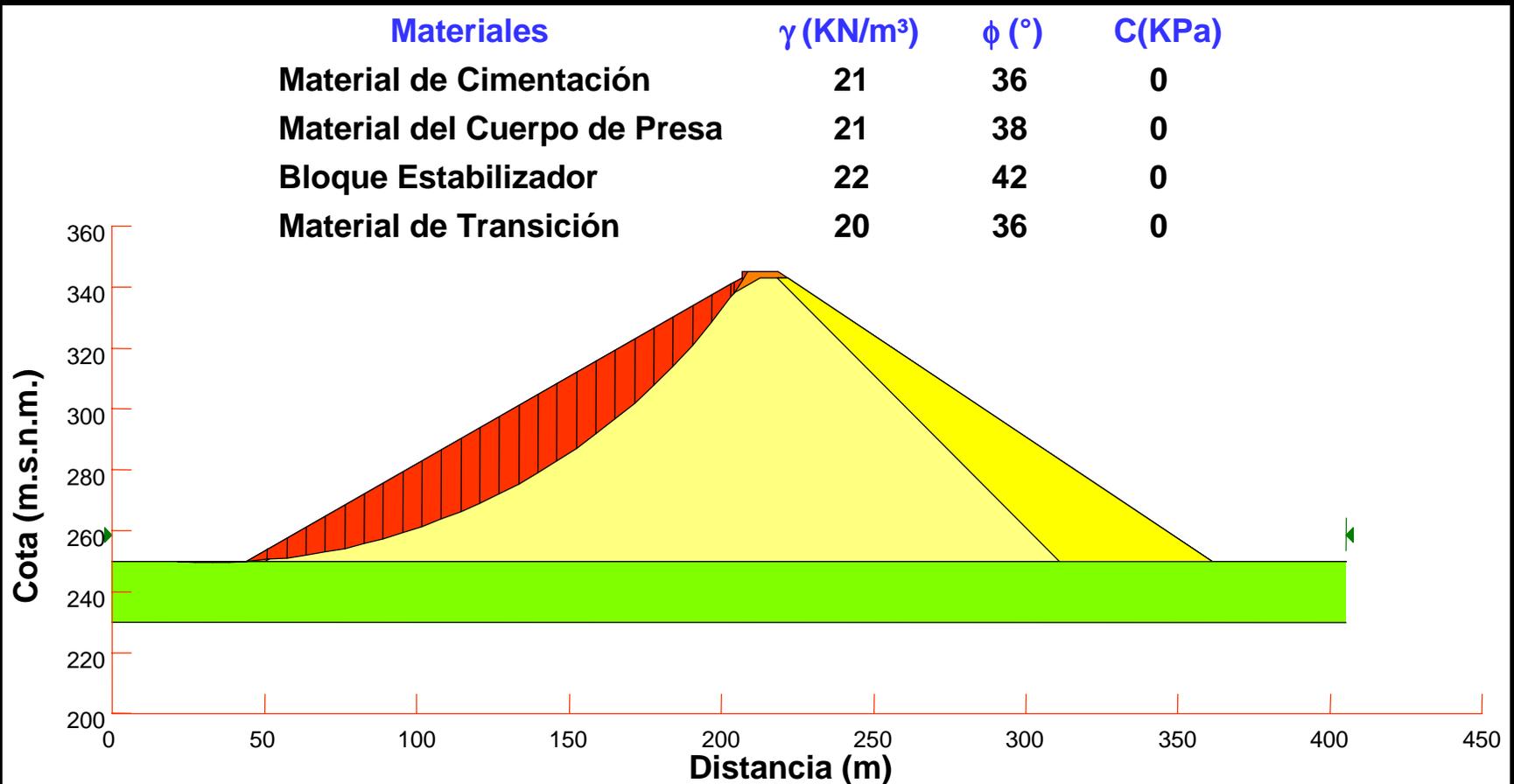
- Estudio de Factibilidad de la Presa Palo Redondo del Proyecto Chavimochic.
- Alternativa Presa de Enrocado con Pantalla de Concreto.
- Ubicada en Quebrada Palo Redondo, volumen total de 370 millones de metros cúbicos, longitud de coronación de 770 metros y altura de 95 metros.
- Coeficiente lateral sísmico = 0.20.
- Sismo de diseño con aceleración máxima de 0.38g y magnitud de Richter de 7.5 para un período de retorno de 500 años.
- Tiempo historia de registro en Lima, sismo de 1974.
- Parámetros conservadores de resistencia cortante de los materiales y modelo hiperbólico esfuerzo-deformación.
- Parámetros dinámicos de la literatura.

SECCIÓN TRANSVERSAL DE LA PRESA PALO REDONDO



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ESTÁTICO TALUD AGUAS ARRIBA (EOC)

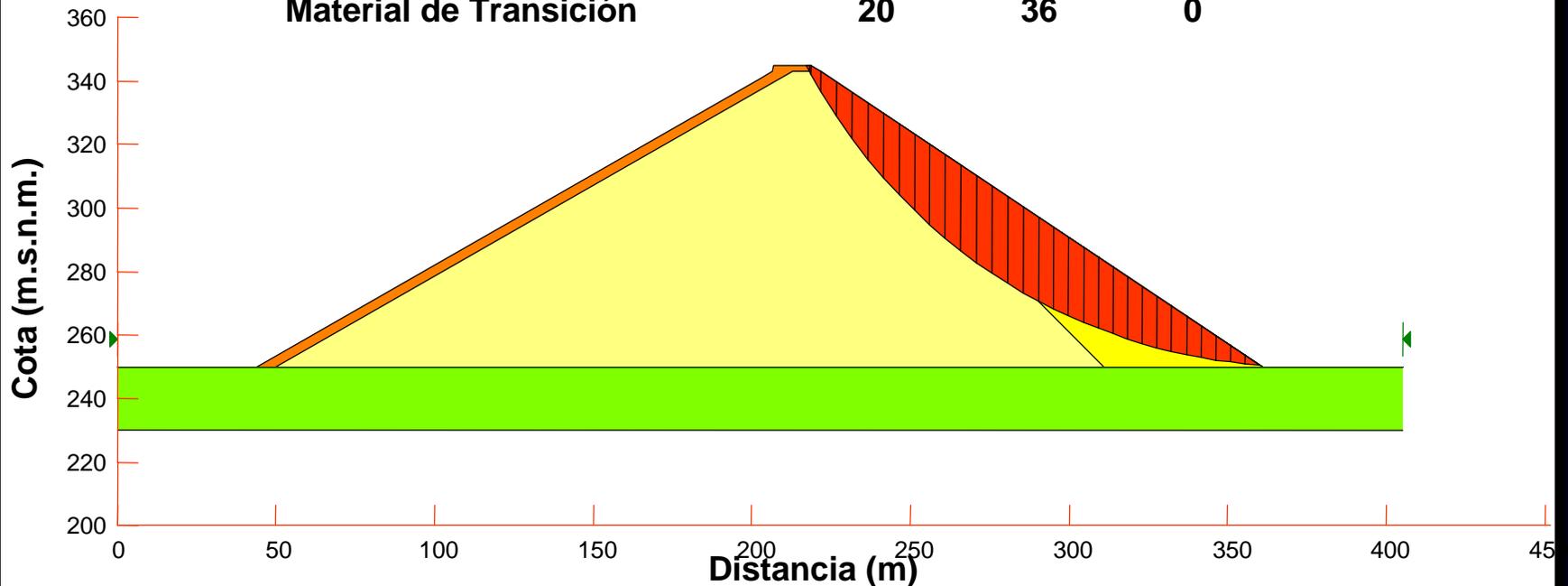
PROGRAMA : SLOPE/W
MÉTODO : BISHOP
FACTOR DE SEGURIDAD : 1.53



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD ESTÁTICO TALUD AGUAS ABAJO (EOC)

PROGRAMA : SLOPE/W
MÉTODO : BISHOP
FACTOR DE SEGURIDAD : 1.44

Materiales	γ (KN/m ³)	ϕ (°)	C(KPa)
Material de Cimentación	21	36	0
Material del Cuerpo de Presa	21	38	0
Bloque Estabilizador	22	42	0
Material de Transición	20	36	0

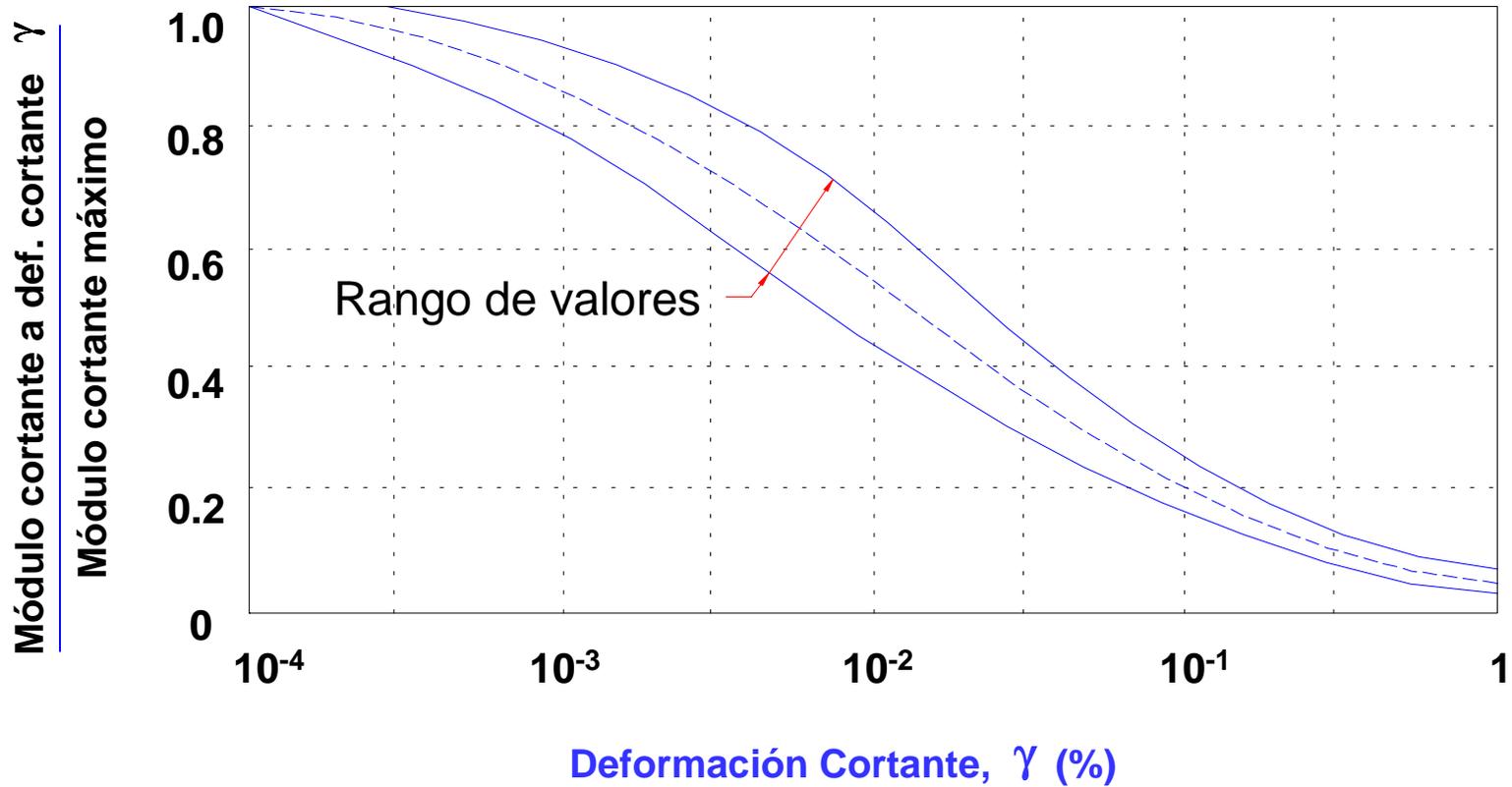


ANÁLISIS DINÁMICO DE RESPUESTA SÍSMICA

- MÉTODOS UNIDIMENSIONALES**
- MÉTODOS BIDIMENSIONALES**
- PROCEDIMIENTOS SIMPLIFICADOS**

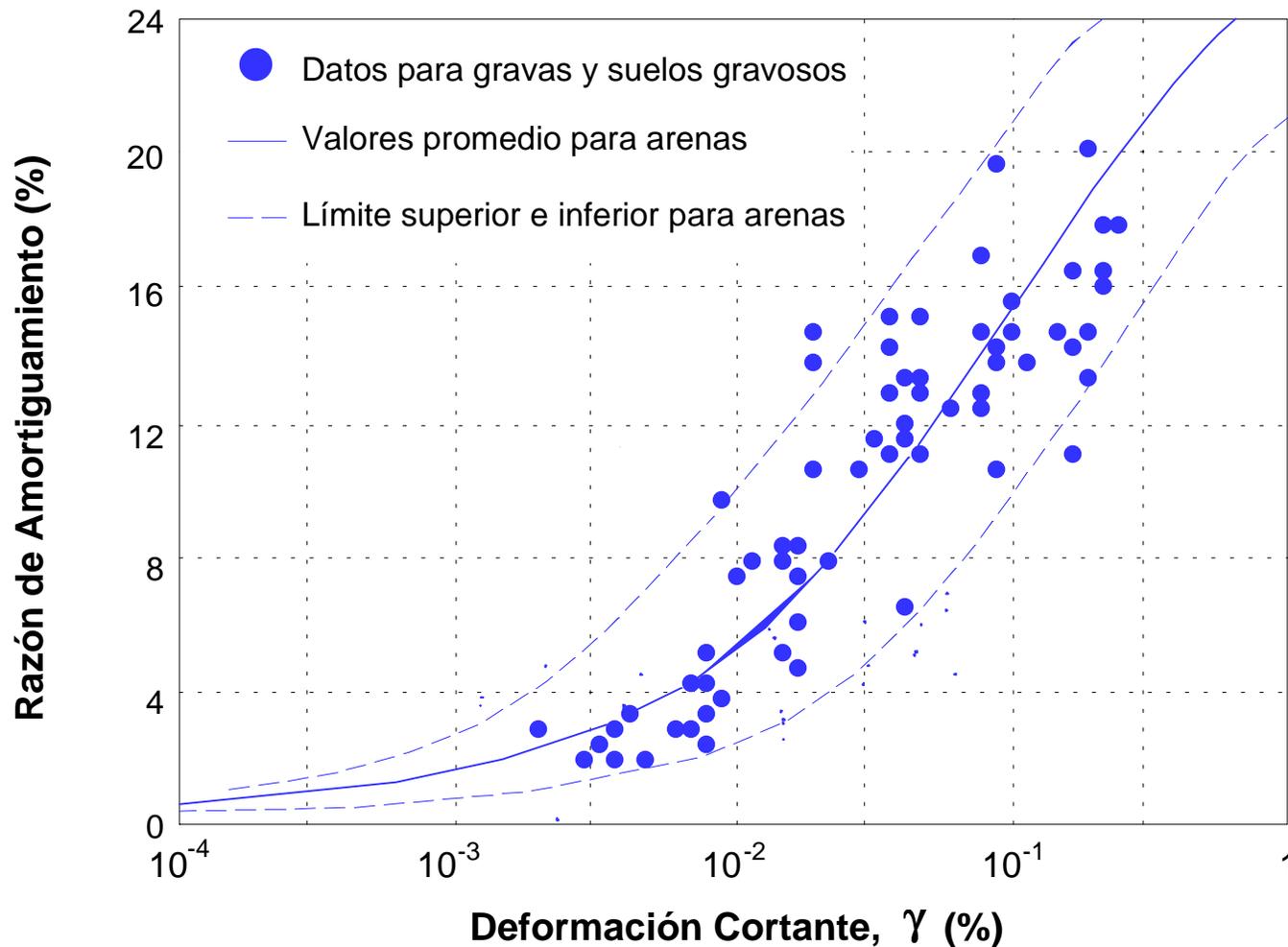
MÓDULO CORTANTE PARA GRAVAS

(Seed et. al., 1984)

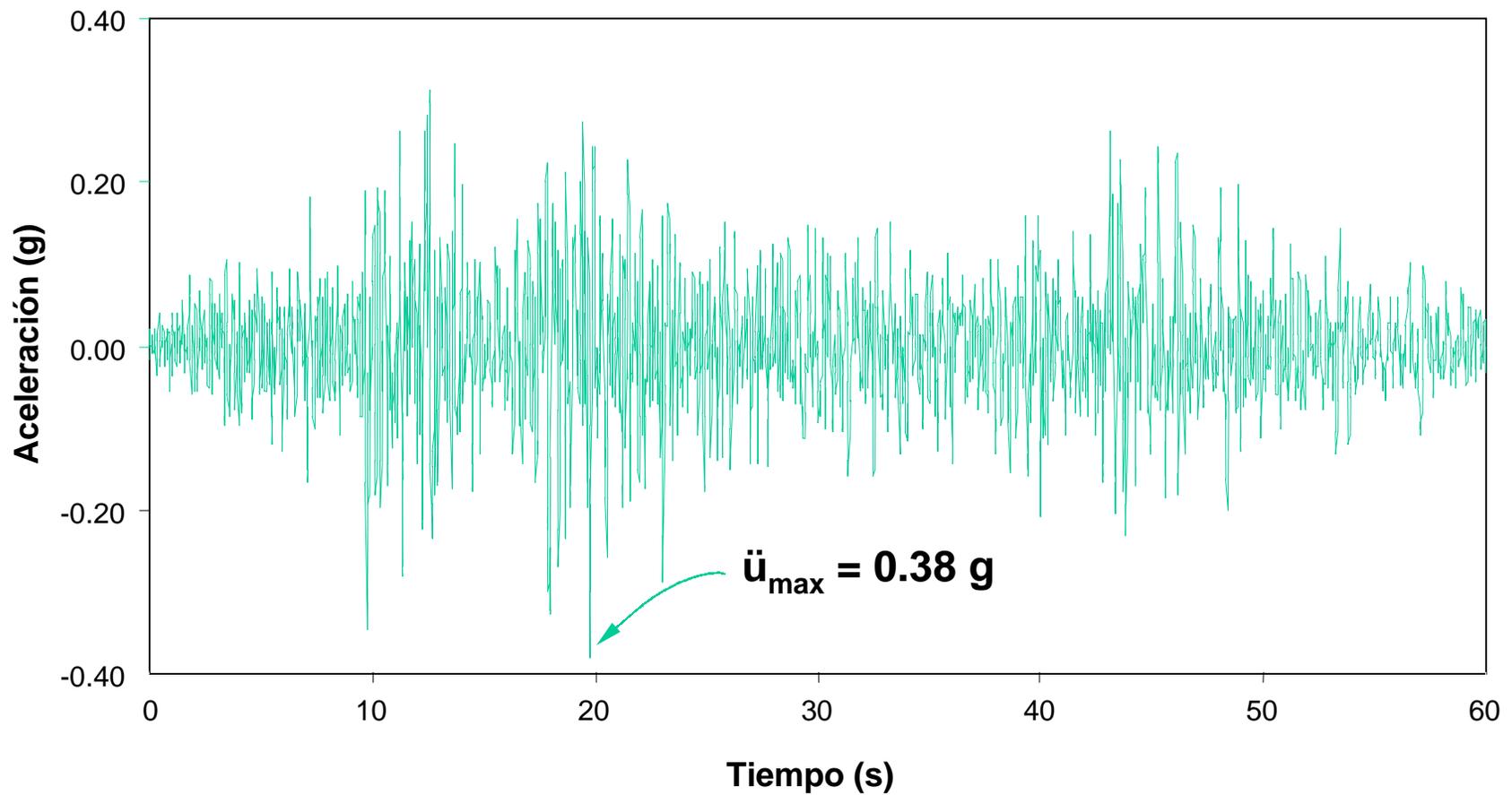


AMORTIGUAMIENTO DE GRAVAS

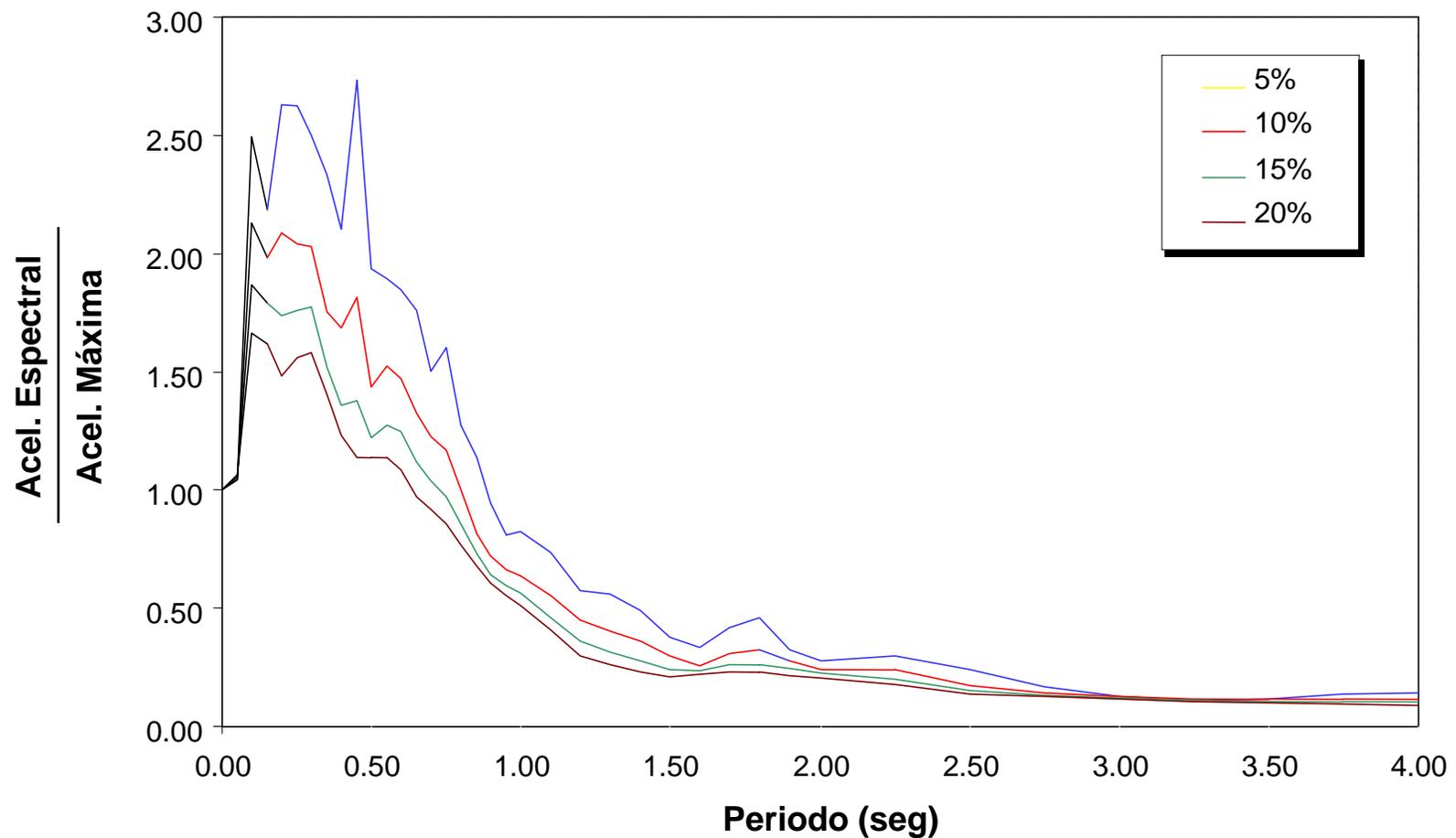
(Seed et al., 1984)



ACELEROGRAMA DEL SISMO DE LIMA-PERÚ 10/74 COMP. N 82° W



ESPECTRO DE RESPUESTA NORMALIZADO DE ACELERACIONES HORIZONTALES SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

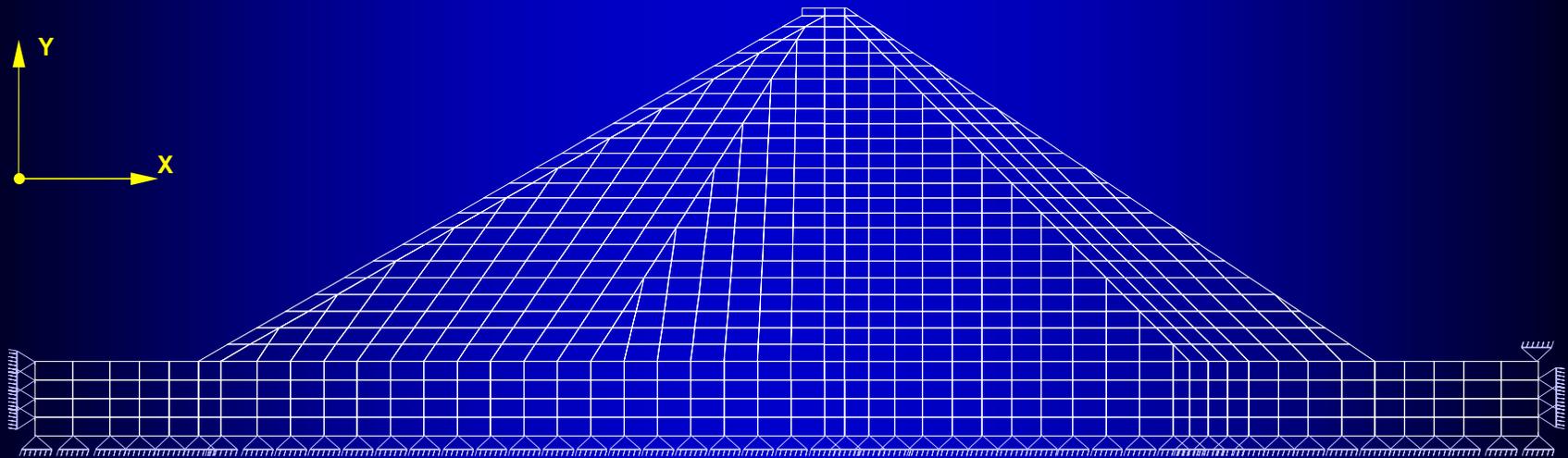


ANÁLISIS BIDIMENSIONAL DE RESPUESTA SÍSMICA

- **Análisis Estático de Esfuerzo-Deformación**
- **Análisis Dinámico**

MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

PRESA PALO REDONDO

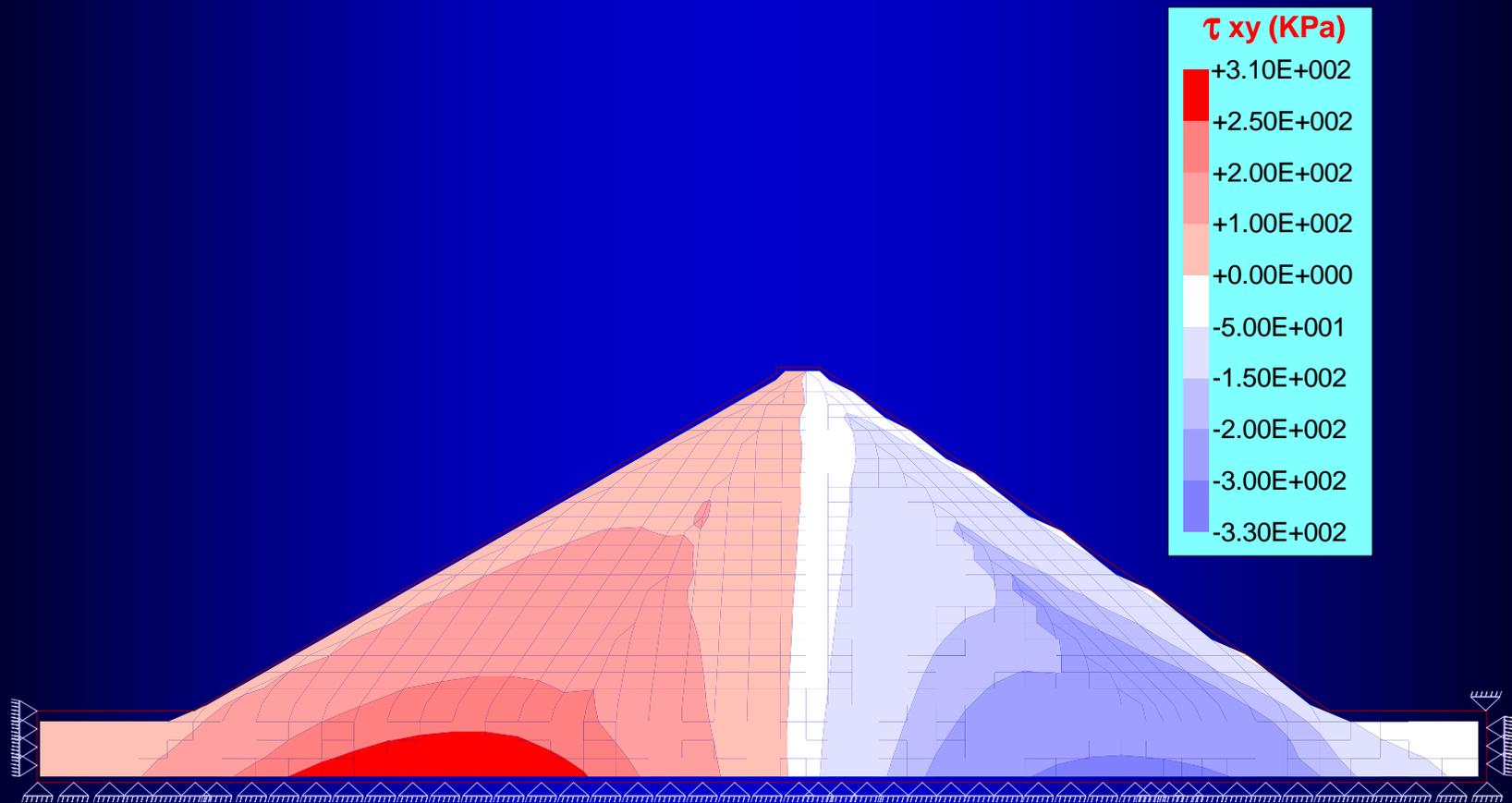


PARÁMETROS HIPERBÓLICOS DE LOS MATERIALES DE LA PRESA PALO REDONDO

Parámetro	Cimentación	Cuerpo de Presa	Bloque Estabilizador	Material de Transición
γ (KN/m ³)	21.00	21.00	22.00	20.00
γ_{sat} (KN/m ³)	22.00	22.00	23.00	21.00
K_o	0.50	0.80	0.80	0.80
K	500	550	600	500
K_{ur}	600	660	720	600
n	0.70	0.80	0.80	0.70
R_f	0.70	0.70	0.70	0.70
K_b	800	1000	1200	800
m	0.30	0.30	0.30	0.30
c (KN/m ²)	0.00	0.00	0.00	0.00
ϕ (°)	36	38	42	36
$\Delta\phi$ (°)	0	0	0	0

ESFUERZOS CORTANTES ESTÁTICOS

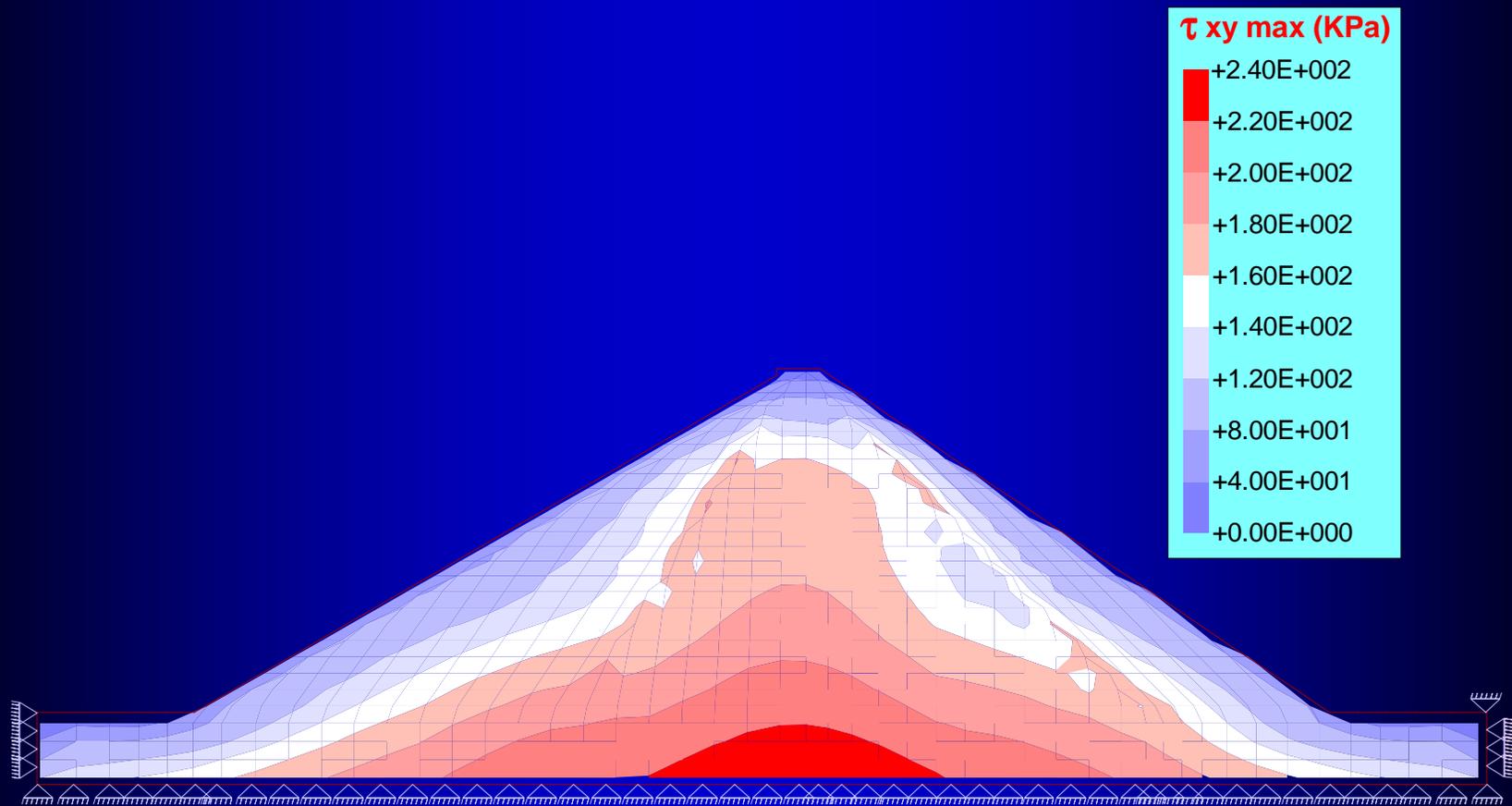
PROGRAMA : FEADAM84



ESFUERZOS CORTANTES MÁXIMOS

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

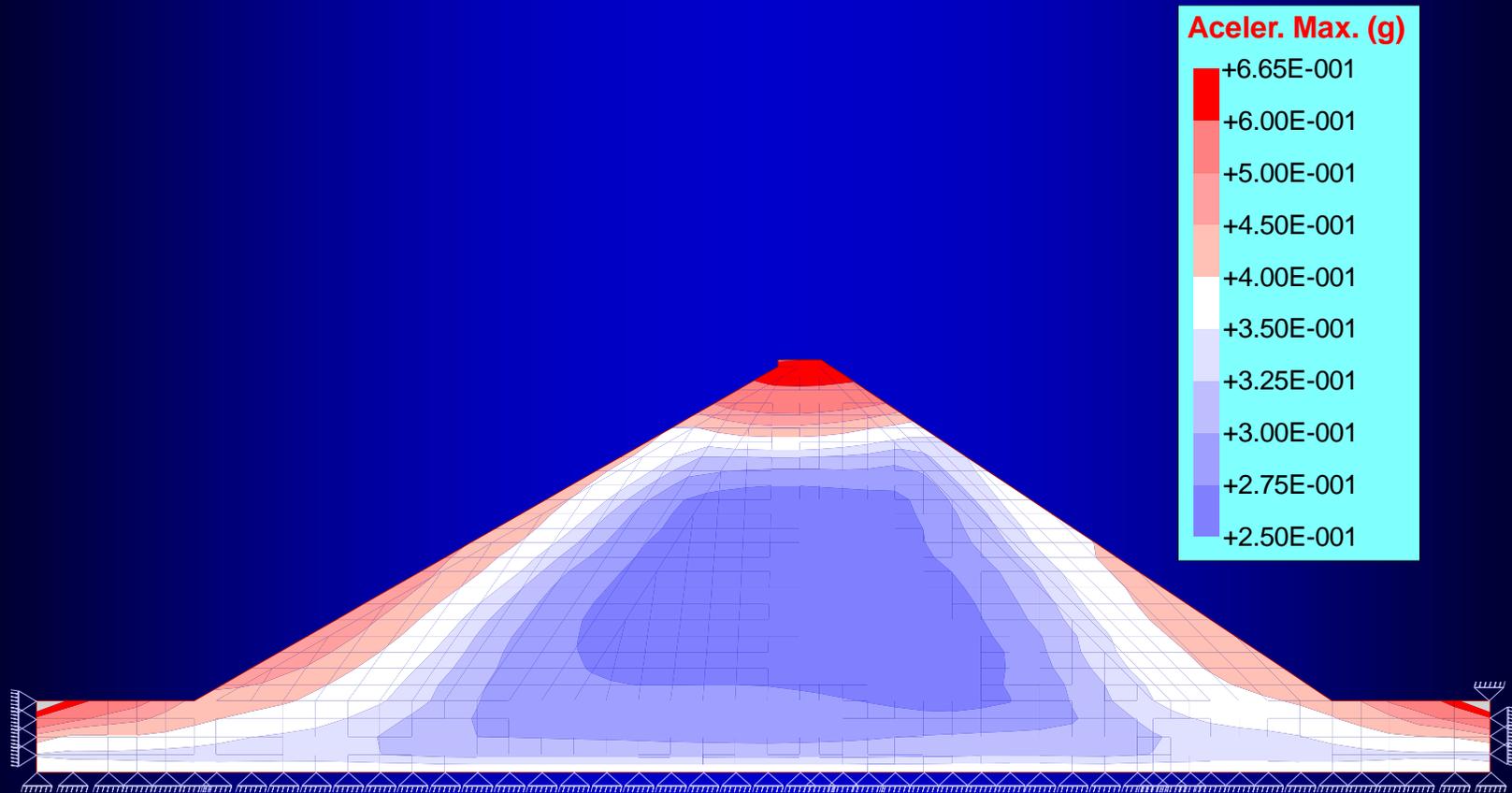
PROGRAMA : QUAD4M



ACELERACIONES MÁXIMAS

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

PROGRAMA : QUAD4M



GEOSOFT

Programa de Análisis Estático y Dinámico de Estructuras Geotécnicas

Desarrollado en el CISMID - FIC - UNI

Principales implementaciones efectuadas en el Programa :

Trabaja bajo entorno WINDOWS

Modelo lineal equivalente para el análisis lineal

Criterios para la evaluación de módulos dinámicos

Curvas de propiedades proporcionadas por el usuario

Métodos de Wilson θ Newmark de integración en el tiempo

Matriz de masa consistente y concentradas

Amortiguamiento variable

Bordes viscosos

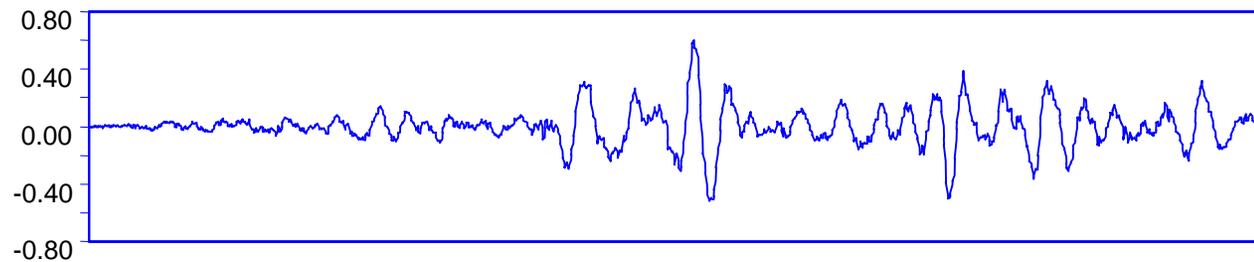
Generación de archivo neutro

COMPARACIÓN DE ACELEROGRAMAS CALCULADOS EN LA CRESTA CON PROGRAMAS BIDIMENSIONALES

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

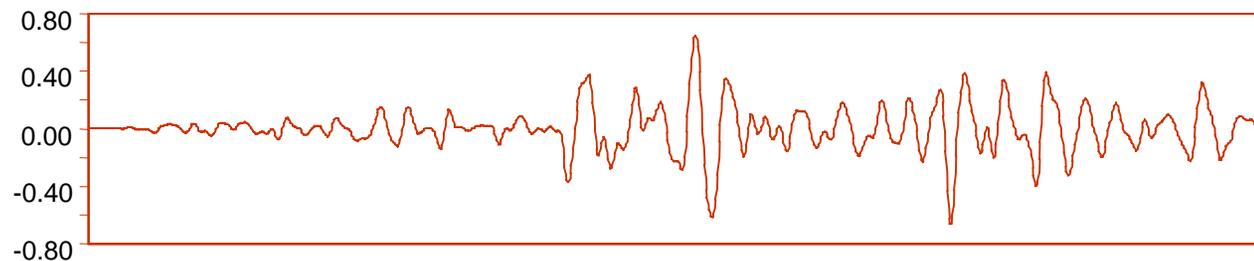
**Acelerograma
Calculado en la Cresta**

PROGRAMA : GEOSOFT



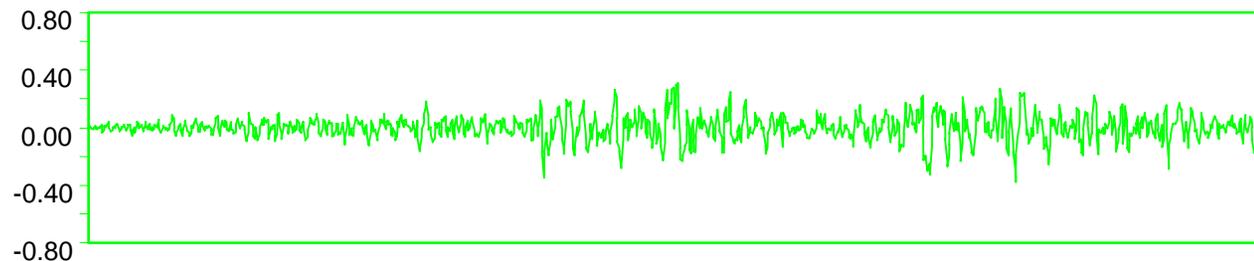
**Acelerograma
Calculado en la Cresta**

PROGRAMA : QUAD4M



**Acelerograma en la
Base Rocosa**

SISMO : LIMA 10/74 N82°W



**PROCEDIMIENTO SIMPLIFICADO
PARA CALCULAR LA MÁXIMA
ACELERACIÓN EN LA CRESTA**

(Makdisi y Seed, 1977)

RESULTADOS AL FINAL DE 5 ITERACIONES

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

ITER.	\ddot{U} max (g)	To (seg)	γ ave (%)	G (T/m ²)	Amortig. (%)
1	1.1039	0.7498	0.0648	23780.20	13.69
2	1.1254	0.7386	0.0644	24503.52	13.43
3	1.1277	0.7374	0.0644	24581.96	13.40
4	1.1279	0.7373	0.0644	24590.87	13.40
5	1.1280	0.7373	0.0644	24591.89	13.40

DEFORMACIONES PERMANENTES

- MÉTODO DE NEWMARK (1965)
- MÉTODO DE MAKDISI Y SEED (1977)
- MÉTODO DE SARMA (1975)

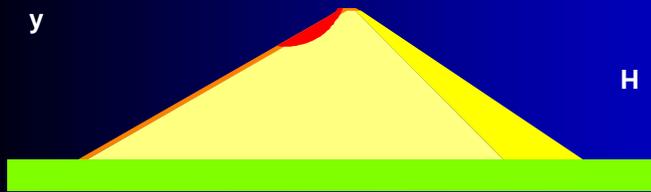
MÉTODO DE NEWMARK

- Determinar la aceleración de fluencia
- Cálculo de las aceleraciones inducidas
- Cálculo de las deformaciones permanentes por integración de las aceleraciones

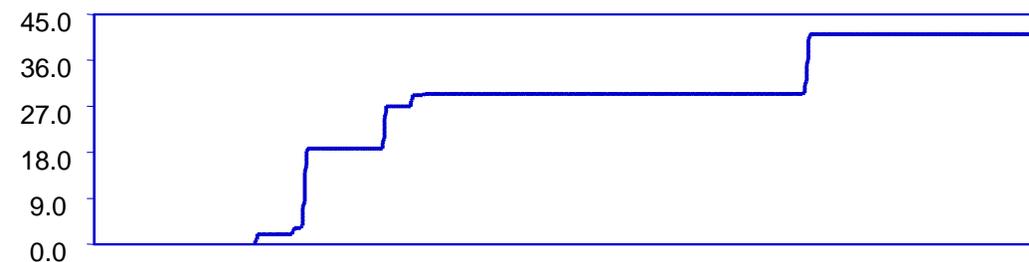
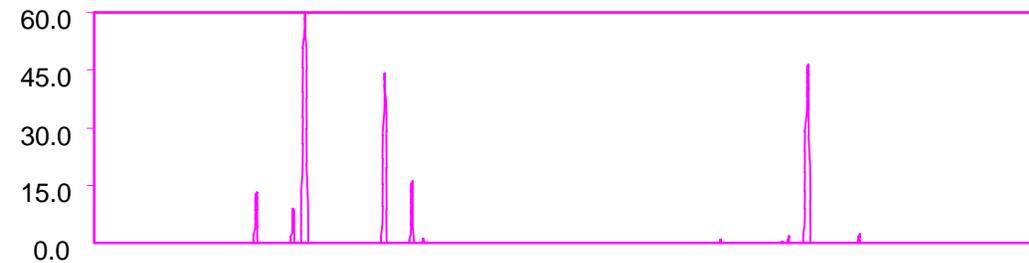
APLICACIÓN DEL MÉTODO DE NEWMARK

TALUD AGUAS ARRIBA

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W



Relación y / H : 0.25
Acel. Máx. cresta : 0.66 g
Coef. Fluencia (K_y) : 0.29 g
Coef. Máximo (K_{max}) : 0.74 g
Desplazamiento (cm) : 41.20 cm



DEFORMACIONES PERMANENTES

MÉTODO DE NEWMARK

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

A. TALUD AGUAS ARRIBA

$$\ddot{u}_{\max} = 0.665 \text{ g}$$

y / H	K_y (g)	K_{\max} (g)	$\frac{K_{\max}}{\ddot{u}_{\max}}$	$\frac{K_y}{K_{\max}}$	Desplaz. (cm)
0.25	0.29	0.7391	1.1116	0.39	41.1960
0.50	0.27	0.4820	0.7249	0.56	13.2533
0.75	0.25	0.3368	0.4915	0.76	1.4984
1.00	0.23	0.2576	0.3874	0.89	0.0936

DEFORMACIONES PERMANENTES

MÉTODO DE NEWMARK

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

B. TALUD AGUAS ABAJO

$$\ddot{u}_{\max} = 0.665 \text{ g}$$

y / H	K_y (g)	K_{\max} (g)	$\frac{K_{\max}}{\ddot{u}_{\max}}$	$\frac{K_y}{K_{\max}}$	Desplaz. (cm)
0.25	0.32	0.4653	0.6998	0.69	1.5323
0.50	0.29	0.2370	0.3564	1.22	0.0000
0.75	0.26	0.1707	0.2567	1.52	0.0000
1.00	0.23	0.1652	0.2485	1.39	0.0000

MÉTODO DE MAKDISI Y SEED

- Determinar la aceleración de fluencia
- Cálculo de la aceleración máxima inducida (K_{\max})
- Cálculo de las deformaciones permanentes

DEFORMACIONES PERMANENTES MÉTODO DE MAKDISI Y SEED

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

A. TALUD AGUAS ARRIBA

$$\ddot{u}_{\max} = 1.128 \text{ g}$$

$$M_s = 7.5$$

y / H	K_y (g)	$\frac{K_{\max}}{\ddot{u}_{\max}}$	K_{\max} (g)	$\frac{K_y}{K_{\max}}$	Desplaz. (cm)
0.25	0.29	0.85	0.959	0.302	99.86
0.50	0.27	0.60	0.677	0.399	34.27
0.75	0.25	0.44	0.496	0.504	13.28
1.00	0.23	0.35	0.395	0.583	5.71

DEFORMACIONES PERMANENTES MÉTODO DE MAKDISI Y SEED

SISMO : LIMA - PERÚ 10/74 COMP. N 82° W

B. TALUD AGUAS ABAJO

$$\ddot{u}_{\max} = 1.128 \text{ g}$$

$$M_s = 7.5$$

y / H	K_y (g)	$\frac{K_{\max}}{\ddot{u}_{\max}}$	K_{\max} (g)	$\frac{K_y}{K_{\max}}$	Desplaz. (cm)
0.25	0.32	0.85	0.959	0.334	90.15
0.50	0.29	0.60	0.677	0.428	26.92
0.75	0.26	0.44	0.496	0.524	11.13
1.00	0.23	0.35	0.395	0.583	6.00

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El análisis de Estabilidad Pseudo-Estático se aplica a presas o diques de enrocado, rellenos cohesivos y arenas densas compactadas.
- El análisis de Estabilidad Dinámico Riguroso se aplica a presas o diques de arenas medianamente densas o cimentación similar. Se debe considerar el método de análisis y la interpretación de resultados.
- El análisis riguroso requiere determinar los esfuerzos estáticos iniciales y la respuesta dinámica con el sismo de diseño. El método de elementos finitos simula la secuencia de construcción y las condiciones de esfuerzos existentes antes del sismo y la respuesta dinámica posterior.
- El análisis de Estabilidad Post-Sismo se utiliza en casos de licuación de suelos y pérdida de resistencia cortante del suelo. Este caso no ha sido tratado en esta presentación.
- La presa Palo Redondo, de enrocado con pantalla de concreto tiene una gran capacidad de resistir sismos muy fuertes con pequeñas deformaciones.
- El Método Simplificado de Deformaciones Permanentes se aplica conservadoramente al caso de la presa Palo Redondo.