UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SECCIÓN DE POSTGRADO

DISEÑO SÍSMICO DE PRESAS DE RELAVE

Dr. Jorge E. Alva Hurtado

REFERENCIAS

- "Tailings Dams and Seismicity" Bulletin 98, ICOLD, 1995

- "Seismic Design and Evaluation of Tailing Dams: State of the Art" W.D. Liam Finn
  International Symposium on Seismic Environmental Aspects of Dams Design Santiago de Chile, 1996

- " Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros"
  Vol VII, Dirección General de Asuntos Ambientales, 1995
  Ministerio de Energía y Minas

- "Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Residuos Sólidos Provenientes de Actividades Mineras"
  Vol XVI, Dirección General de Asuntos Ambientales, 1998
  Ministerio de Energía y Minas

- Slopes and Embankments
  P. Seco e Pinto
  Earthquake Geotechnical Engineering
  Lisboa, 1999

DISEÑO SÍSMICO DE PRESAS DE RELAVE

- INTRODUCCIÓN
- SEGURIDAD SÍSMICA DE PRESAS DE RELAVE
- CONSIDERACIONES SÍSMICAS
- LICUACIÓN DE SUELOS
- RESISTENCIA RESIDUAL
- ANÁLISIS SÍSMICO
- MEDIDAS DE REMEDIACIÓN
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

INTRODUCCIÓN

- Fallas en depósitos de relave por eventos sísmicos tienen severas consecuencias: Pérdidas de vidas
  Pérdidas económicas
  Daño al medio ambiente

- Filosofía de diseño: evitar fallas y accidentes

- Se necesita adecuada caracterización física, mecánica y dinámica de los materiales de relave

- Evaluación de la estabilidad dinámica del depósito

FACTORES QUE AFECTAN LA ESTABILIDAD SÍSMICA DE LAS PRESAS DE RELAVE

- Características de sismos potenciales
- Propiedades estáticas y dinámicas de los materiales
- Potencial de licuación de suelos
- Método de diseño y construcción
- Métodos de análisis sísmico
- Resistencia residual de materiales licuados
- Potencial de flujo por deformación
- Medidas de remediación

SEGURIDAD SÍSMICA DE PRESAS DE RELAVE

- Método aguas - arriba
- Método aguas - abajo
- Método línea central

La presa de relave más segura es la construida con el método aguas - abajo, con arena compactada y ciclonaje

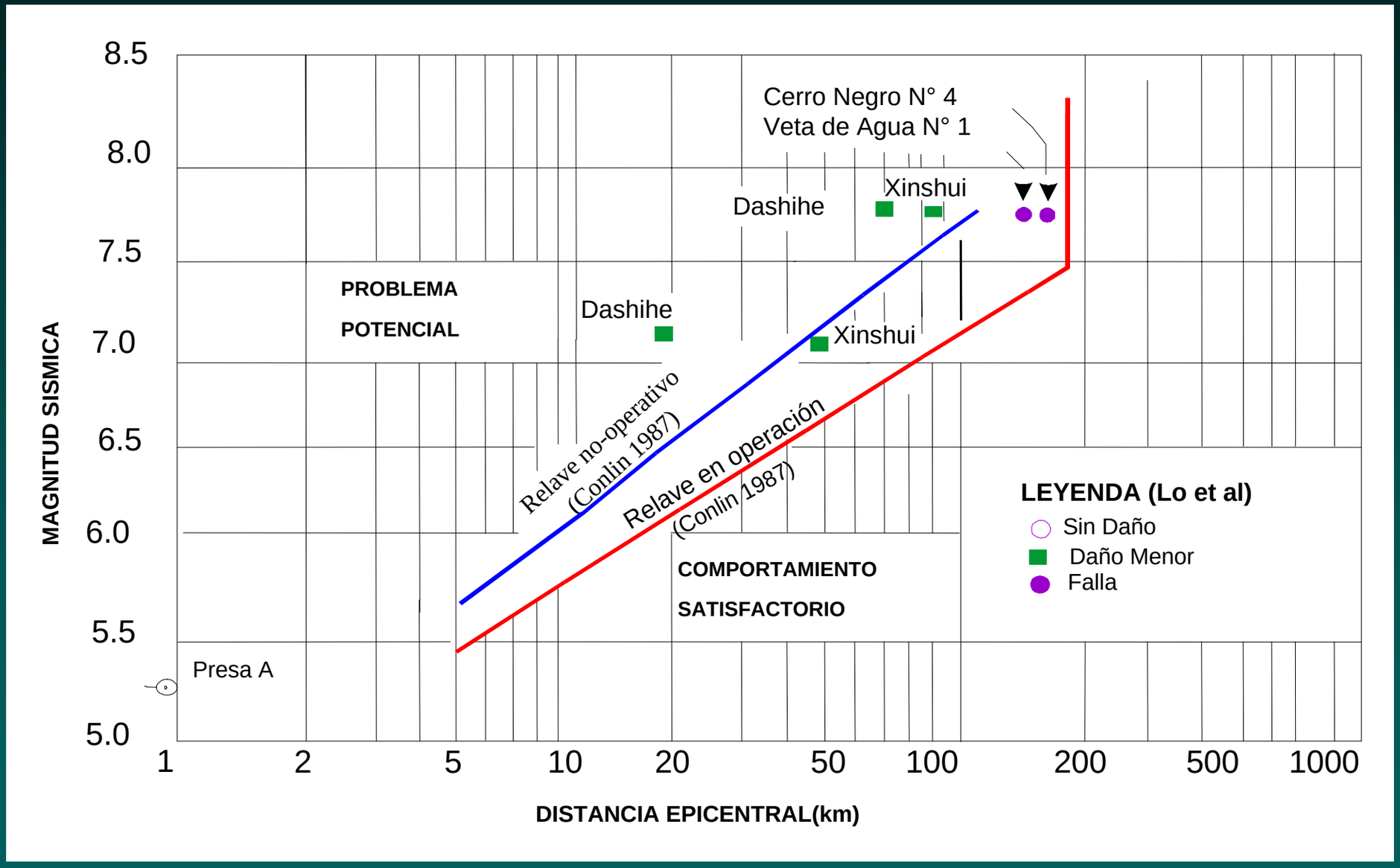
Las presas construidas con el método de línea central apropiadamente construida y la de aguas - abajo son estables ante la acción sísmica

Las presas de relave aguas-arriba son muy vulnerables a la licuación y falla bajo sismos moderados a severos

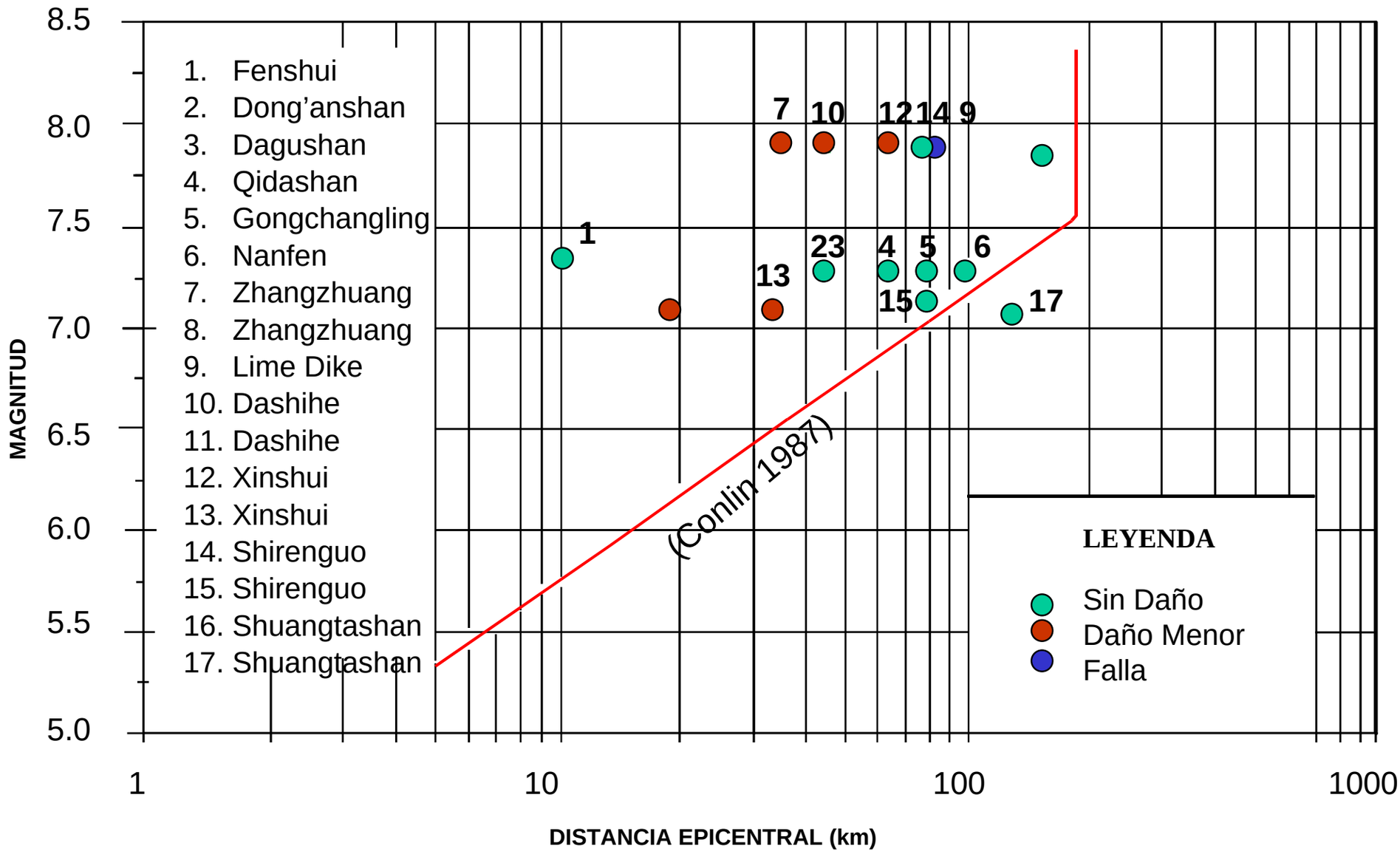
Las presas de relave en operación son más susceptibles a la falla por sismo

En China los taludes son de 1:4 a 1:5 (V:H), y tienen concentraciones de 20%, siendo más estables

SUSCEPTIBILIDAD DE PRESAS DE RELAVE AGUAS-ARRIBA AL DAÑO SÍSMICO (CONLIN, 1987; Lo et al, 1988)



COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PRESAS DE RELAVE CHINAS (Xin et al, 1992)



CONSIDERACIONES SÍSMICAS

- Estudio de Peligro Sísmico
  * Método Determinístico
  * Método Probabilístico

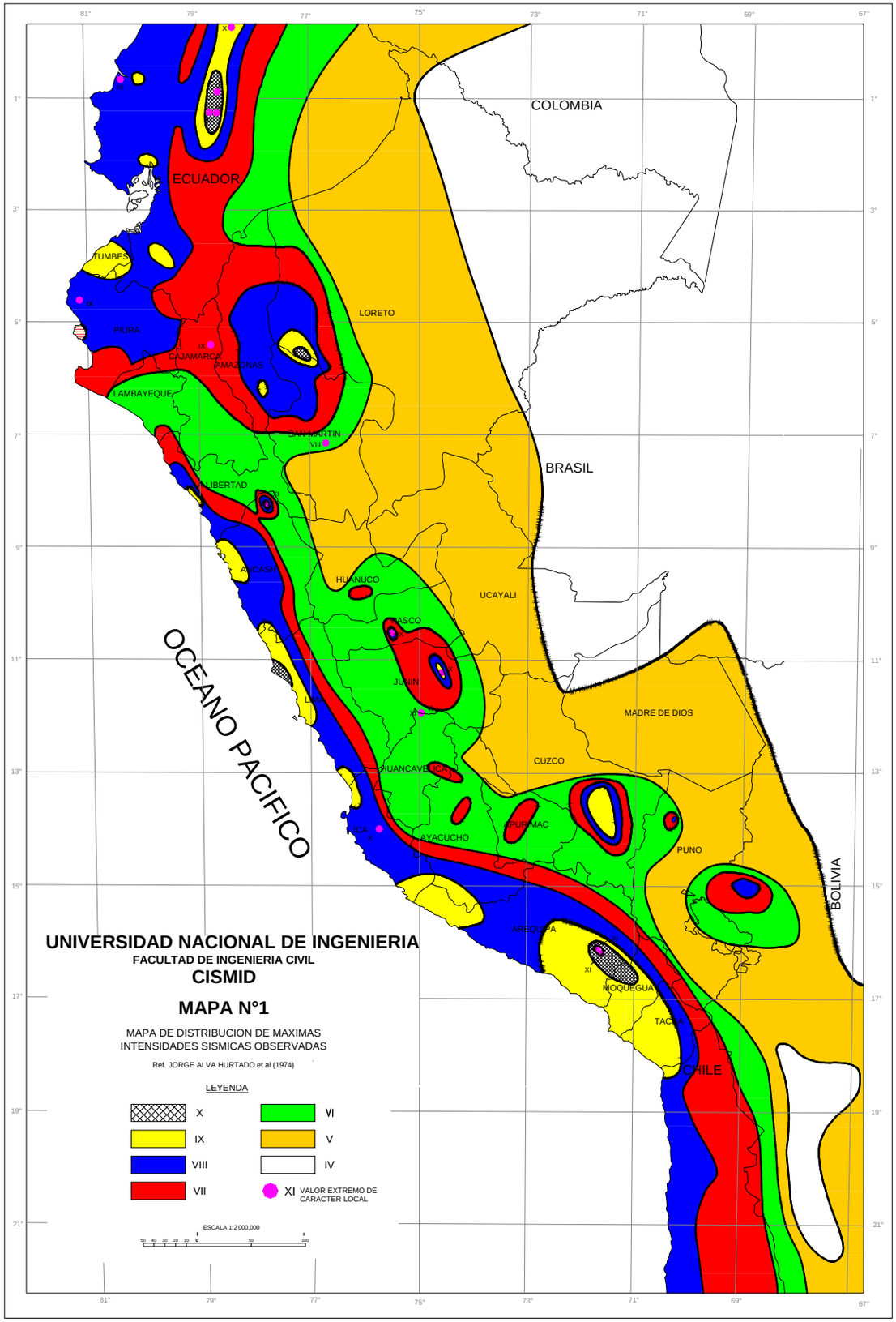
- Máximas Intensidades Sísmicas Observadas

- Catálogo de Hipocentros

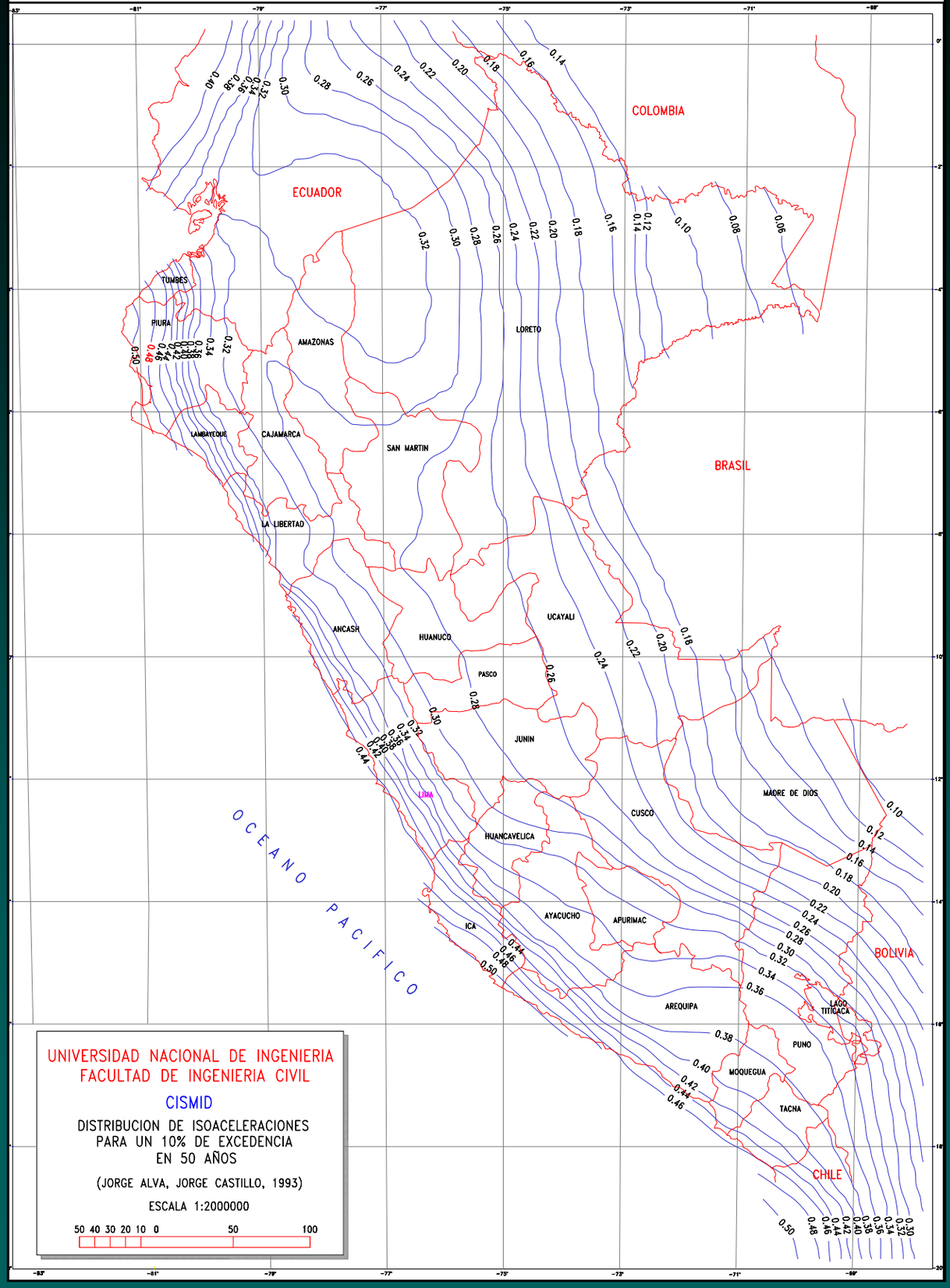
- Determinación de Aceleraciones Máximas y Espectros de Respuesta

- Magnitud del Sismo

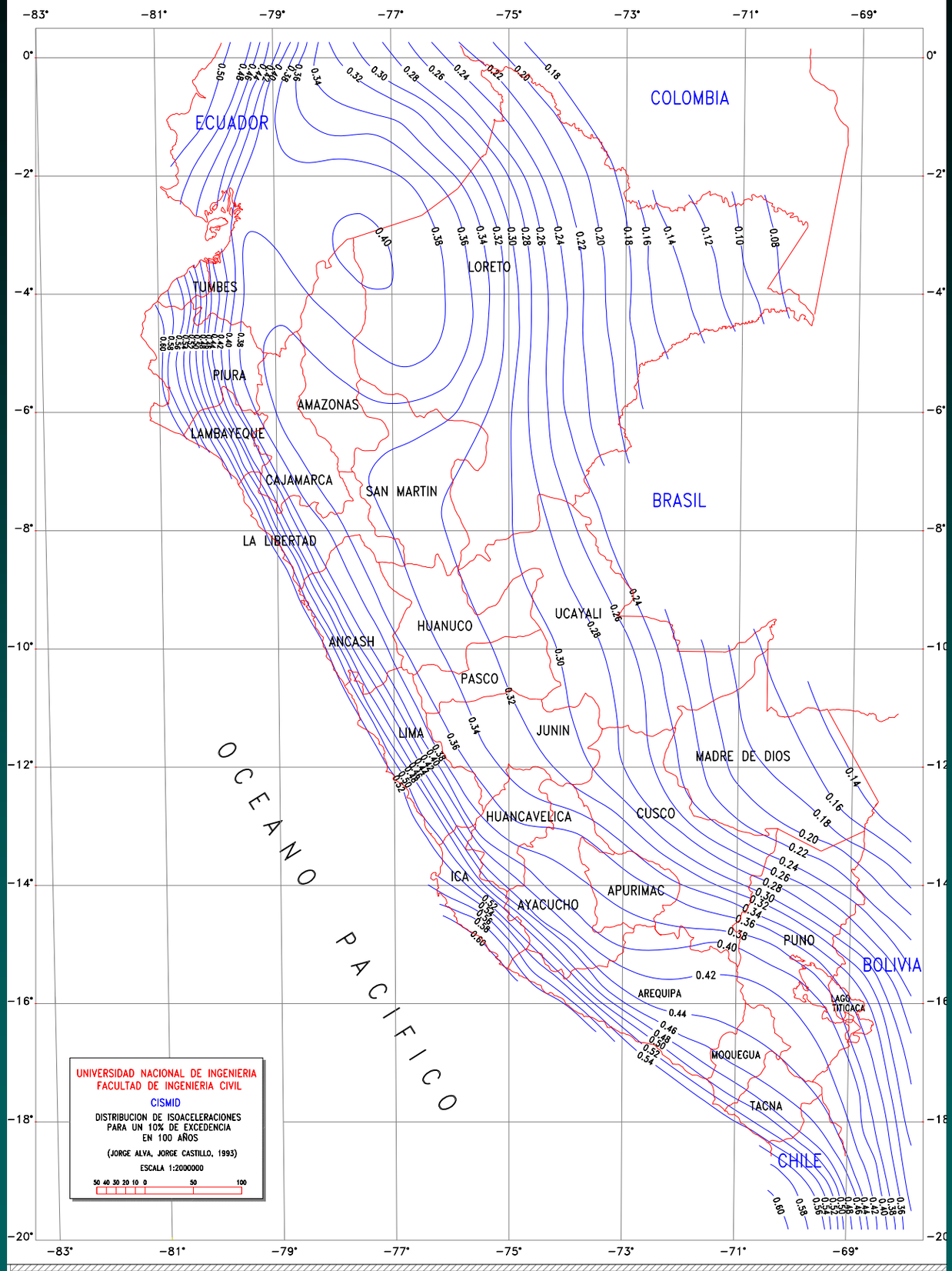
- Registro Tiempo - Historia de Aceleraciones



(Alva et al,1984)

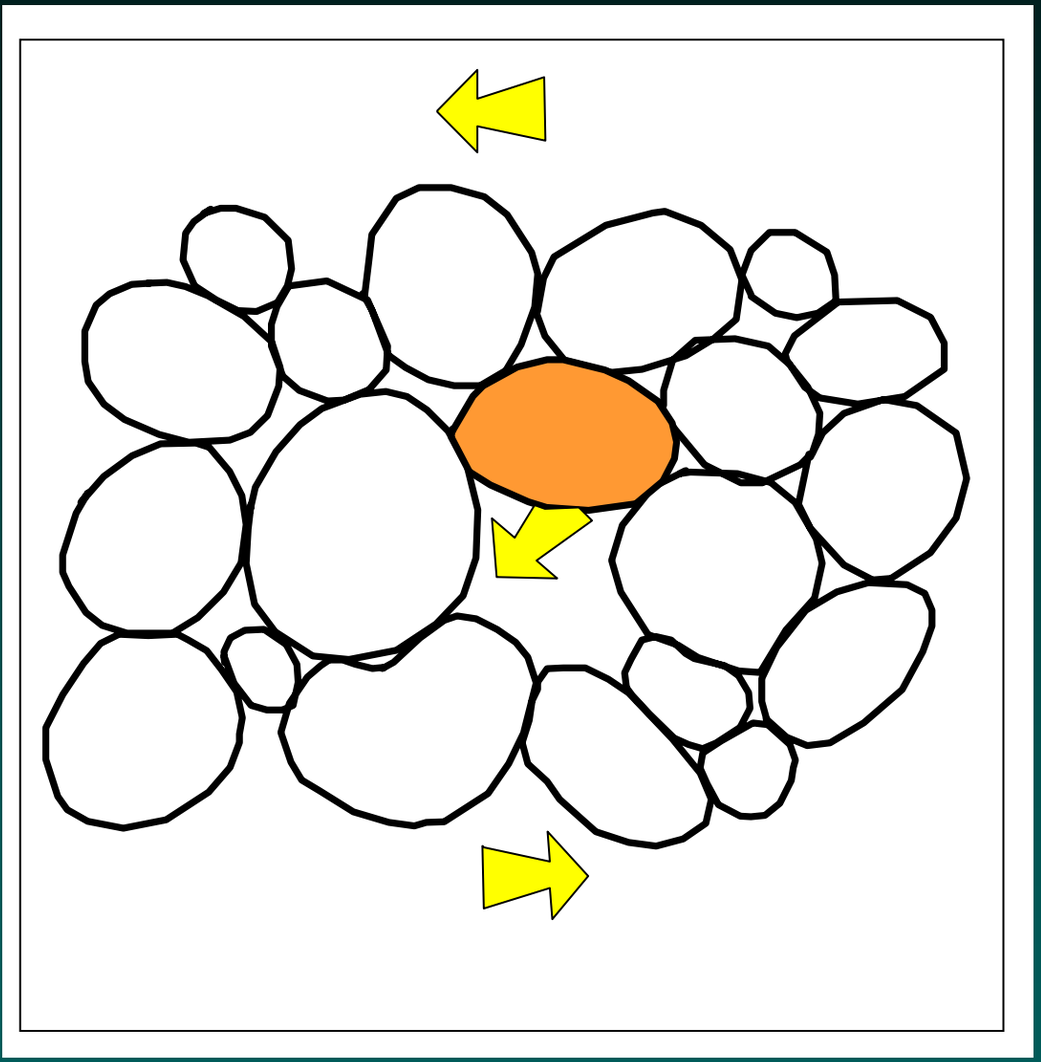


(Castillo y Alva, 1992)



(Castillo y Alva,1992)

Licuación de Suelos



Esquema de un paquete de granos de arena saturada. La deformación por corte está indicada por las flechas horizontales. Ella ocasiona el colapso de la partícula señalada por la flecha inclinada.

(Youd, 1992)

Licuación de Suelos

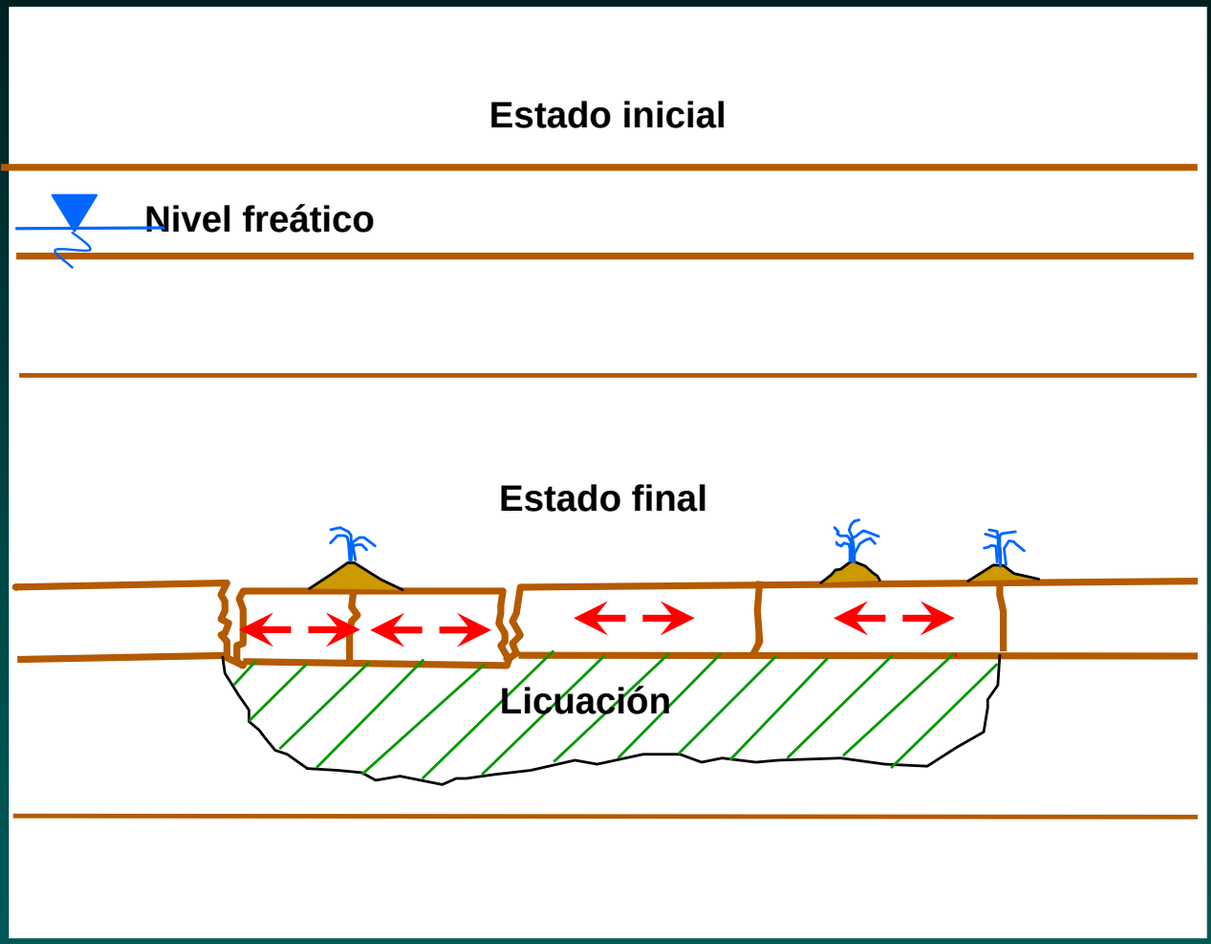
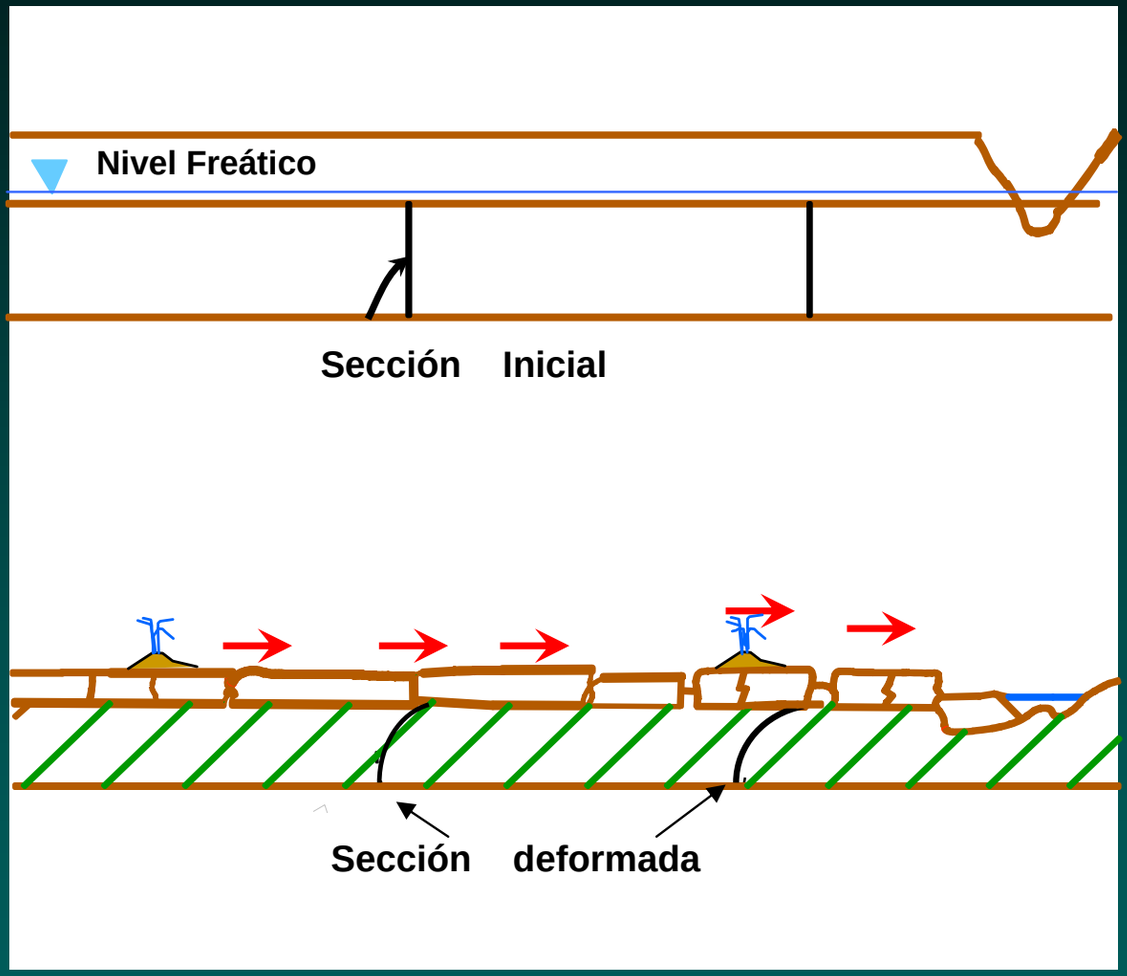


Diagrama de oscilación causada por licuación en la zona achurada. Ella ocasiona el desacople de las capas de suelo. La capa desacoplada oscila de modo diferente al suelo vecino, causando agrietamientos

(Youd, 1992)

Licuación de Suelos



Esquema de lo que ocurre con un desplazamiento o corrimiento lateral

(Youd, 1992)

Licuación de Suelos

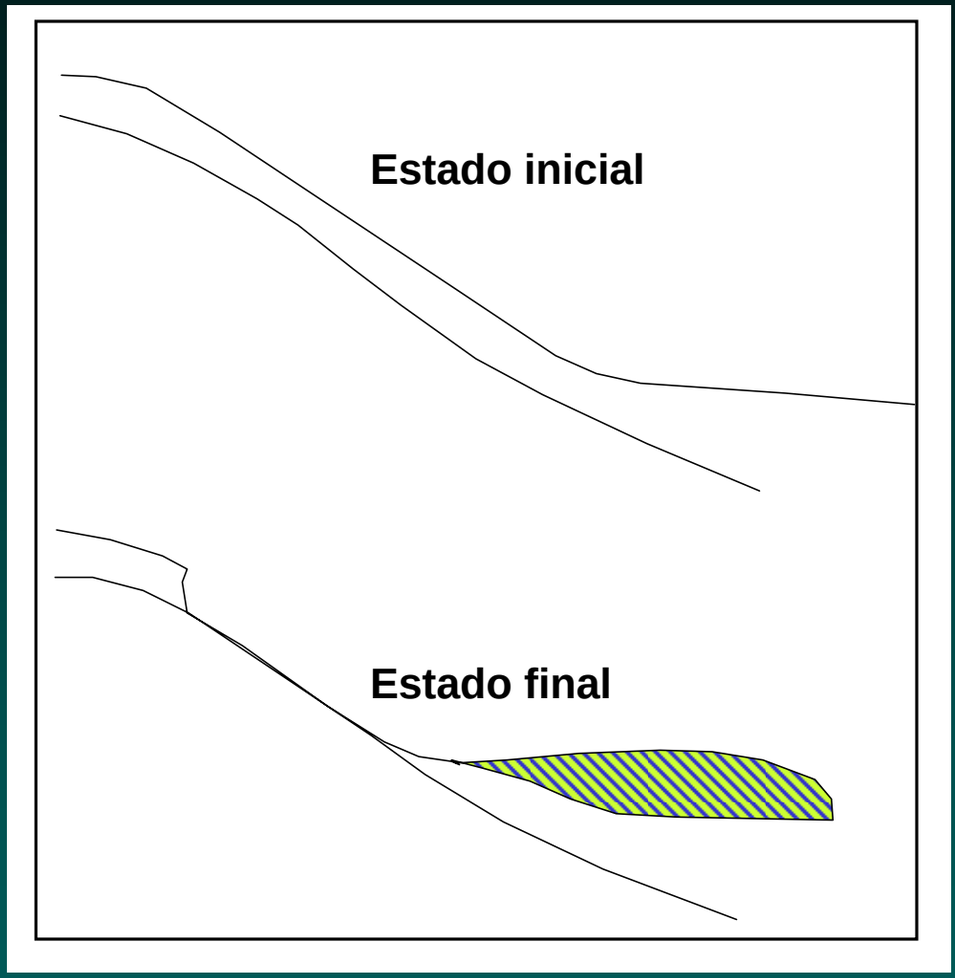


Diagrama de un deslizamiento causado por licuación y pérdida de resistencia cortante de suelos en una pendiente pronunciada. La pérdida de resistencia ocasiona inestabilidad y el deslizamiento por la ladera

(Youd, 1992)

Licuación de Suelos

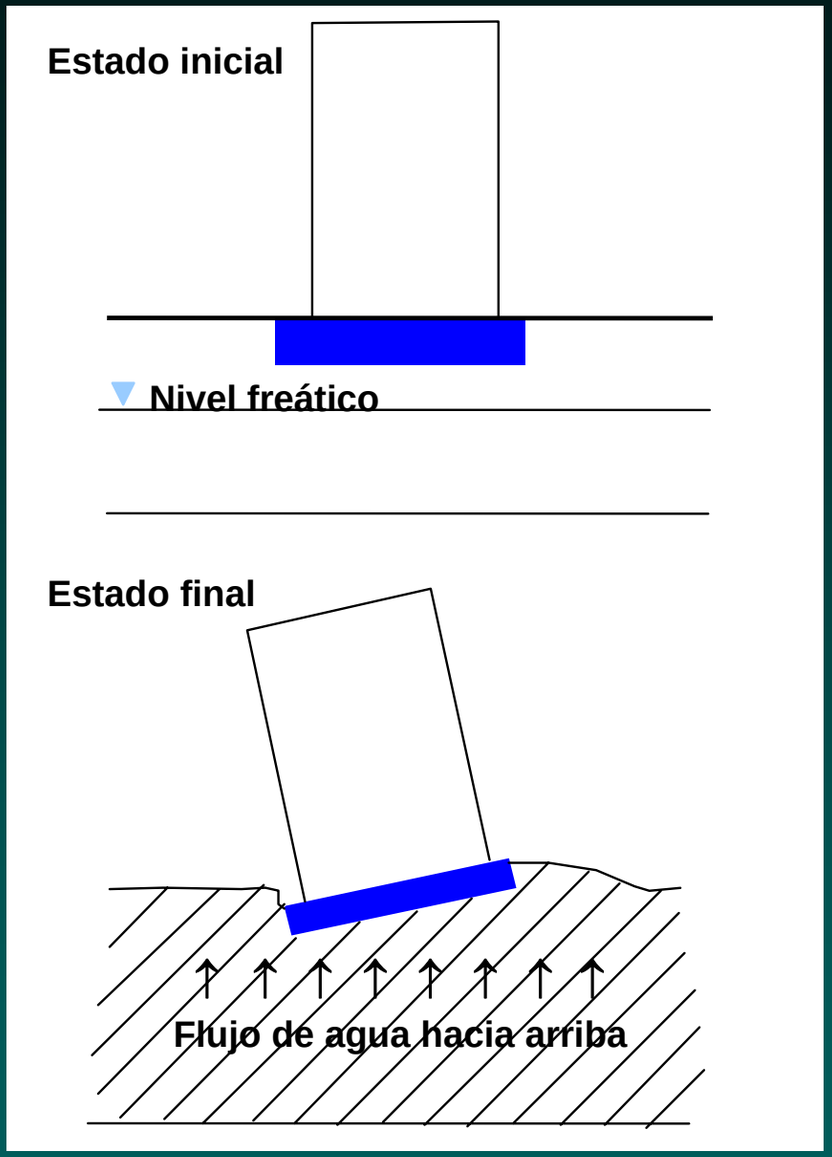


Diagrama de una estructura inclinada como consecuencia de la pérdida de capacidad portante. La licuación debilita al suelo, reduce su capacidad de soporte y permite que las estructuras se asienten e inclinen

(Youd, 1992)

EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

- Método Simplificado de Seed e Idriss, en base a ensayos SPT, CPT y Vs

- Correcciones para tomar en consideraciones efectos de sobrecarga, nivel del terreno y magnitud sísmica $K\sigma$, $K\alpha$ y Km

Factor de Seguridad a la Licuación

$$FRL = \frac{(\tau_1 / \bar{\sigma}_o)}{(\tau_d / \bar{\sigma}_o)}$$

Si FRL < 1 se producirá licuación

Si FRL > 1 no se producirá licuación

Método Simplificado de Seed-Idriss

Relación de esfuerzos cíclicos inducidos por el terremoto

$$\frac{\tau_d}{\overline{\sigma_o}} = 0.65 \quad \frac{a_{max}}{g} \quad \frac{\sigma_o}{\overline{\sigma_o}} \quad r_d$$

τ_d = esfuerzo cortante promedio inducido

a_{max} = aceleración máxima

g = aceleración de la gravedad

σ_o = esfuerzo total vertical

$\overline{\sigma_o}$ = esfuerzo efectivo vertical

r_d = factor de reducción

Método Simplificado de Seed-Idriss

Relación de esfuerzos cíclicos resistentes

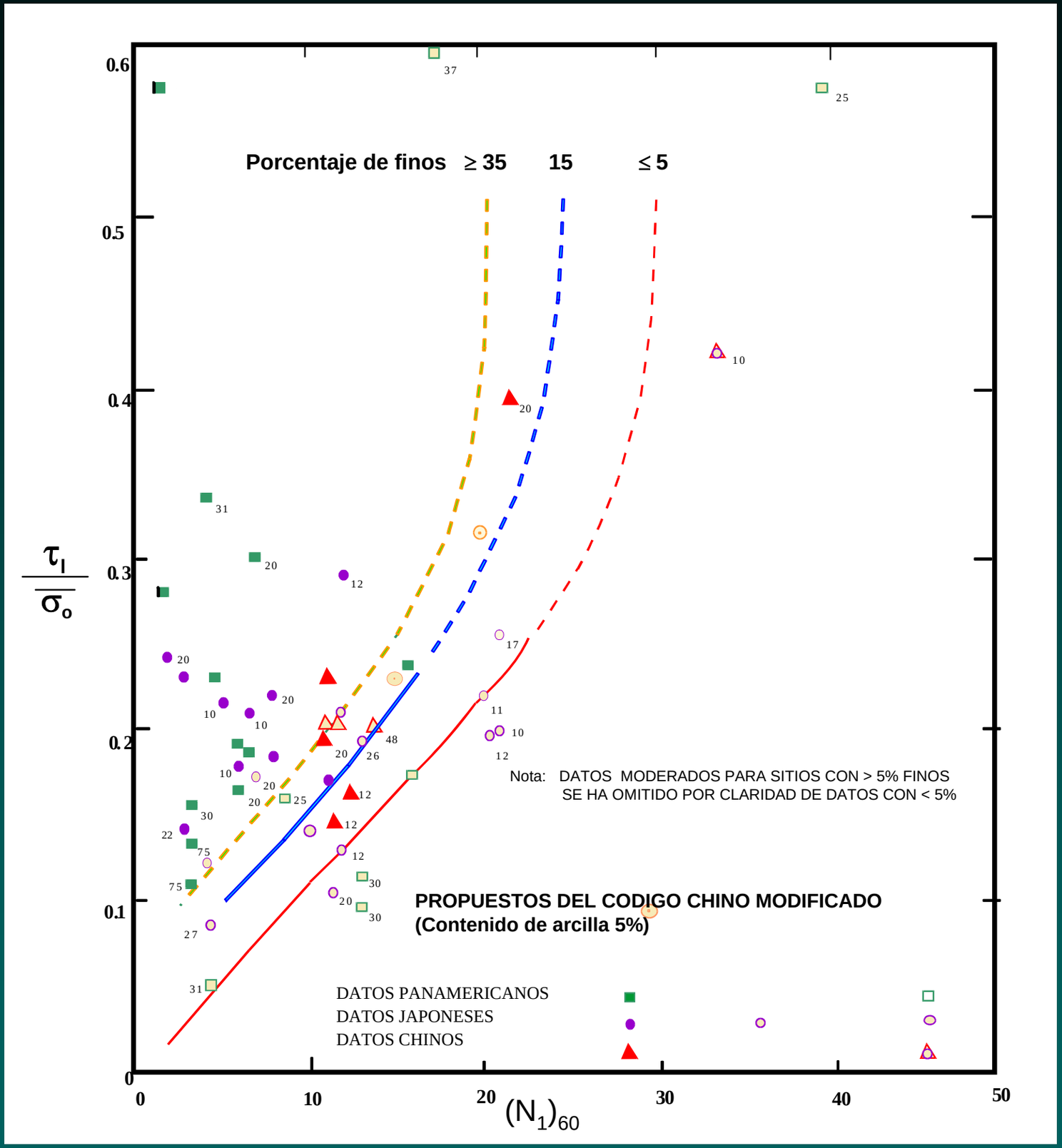
$\frac{\tau_l}{\bar{\sigma}_o}$ Del gráfico para Ms= 7.5 y distinto contenido de finos

$(N_1)_{60}$ = Valor de N corregido a una sobrecarga de 1 kg/cm^2 y 60% de eficiencia

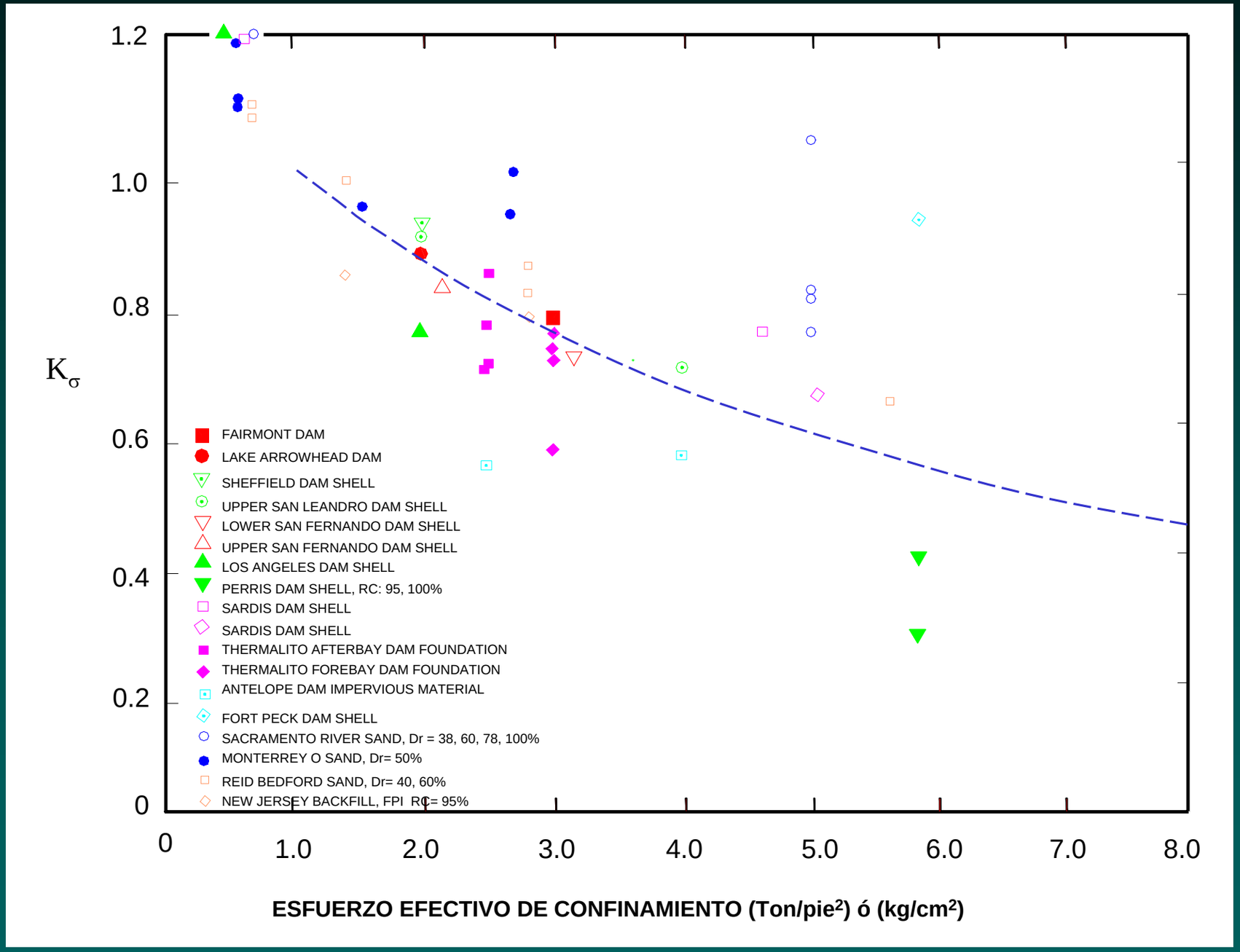
$$(N_1)_{60} = C_N\,(N)_{60}$$

$\sqrt{\frac{1}{\bar{\sigma}_o}}$ = C_N (Factor de corrección) < 2.0

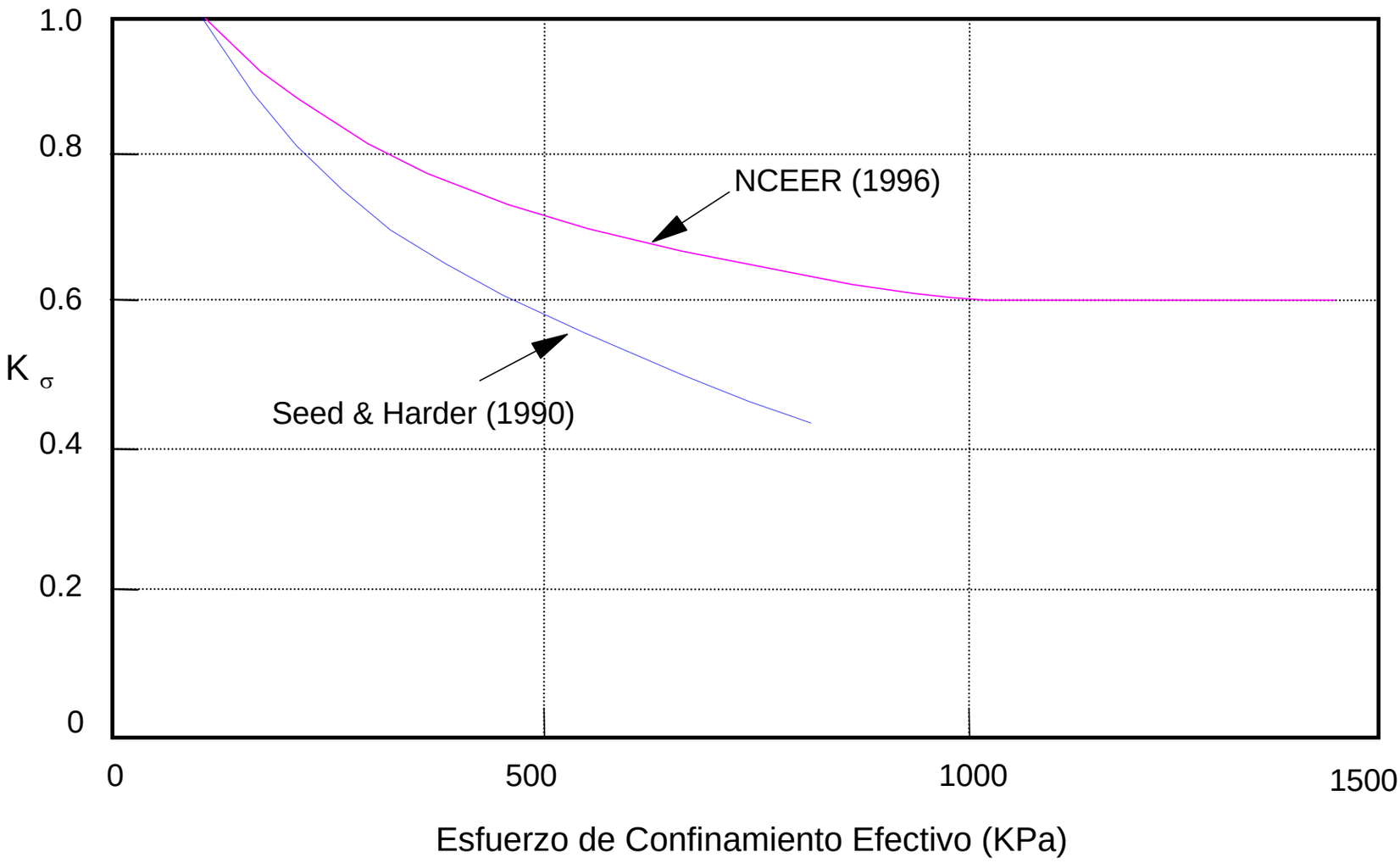
Relación entre valores de esfuerzo cíclico que causa licuación y valores de N_1 para sismos de M = 7.5 (Ref, Seed et al., 1984)



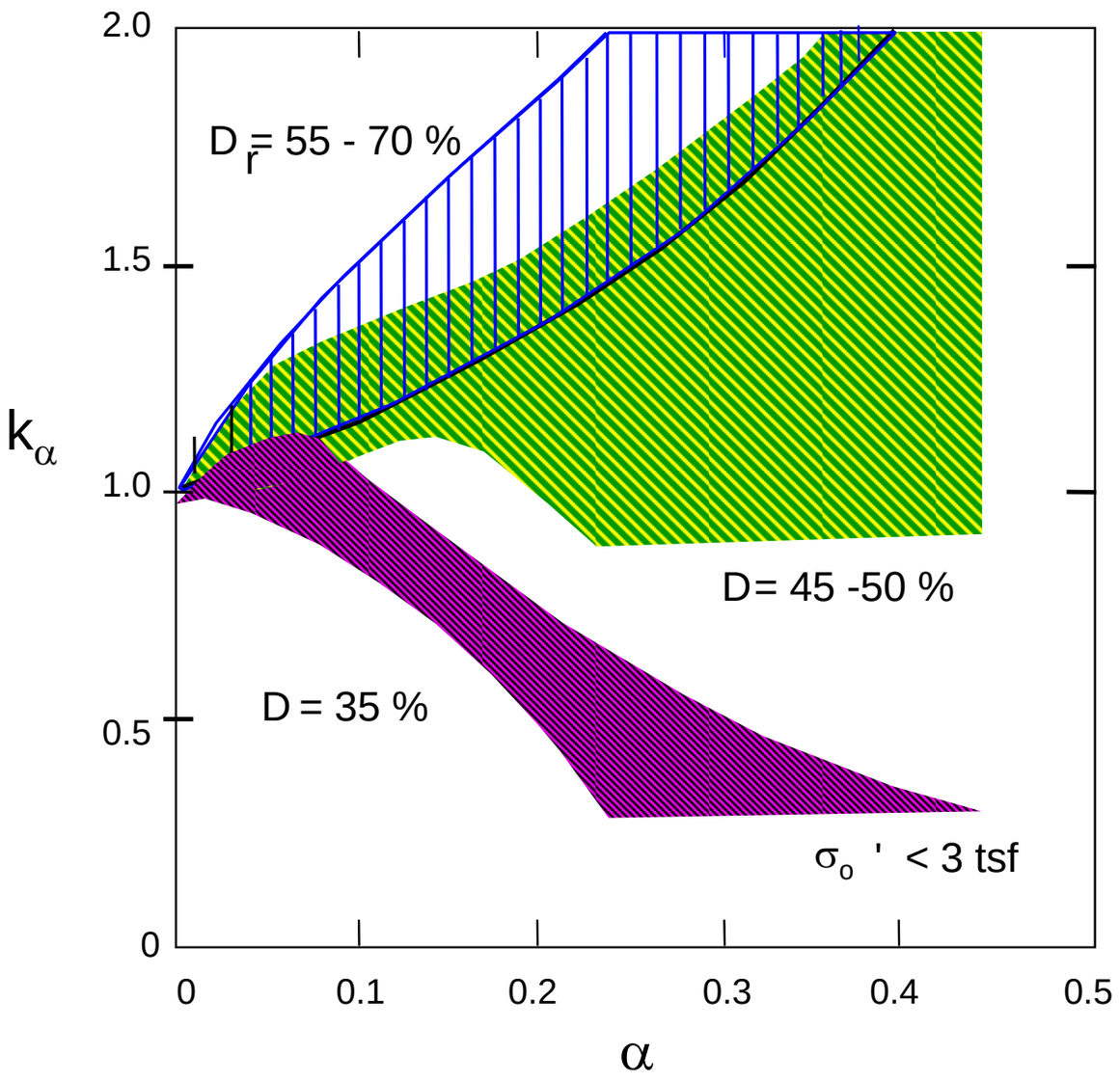
Relación Entre Esfuerzo Efectivo Vertical ($\bar{\sigma}_0$) y Kσ

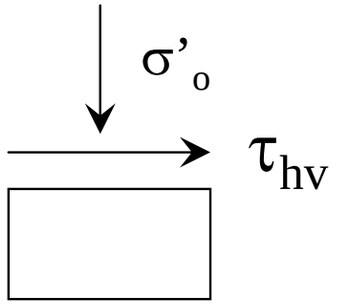


Corrección por Sobrecarga



Relación entre α y k α

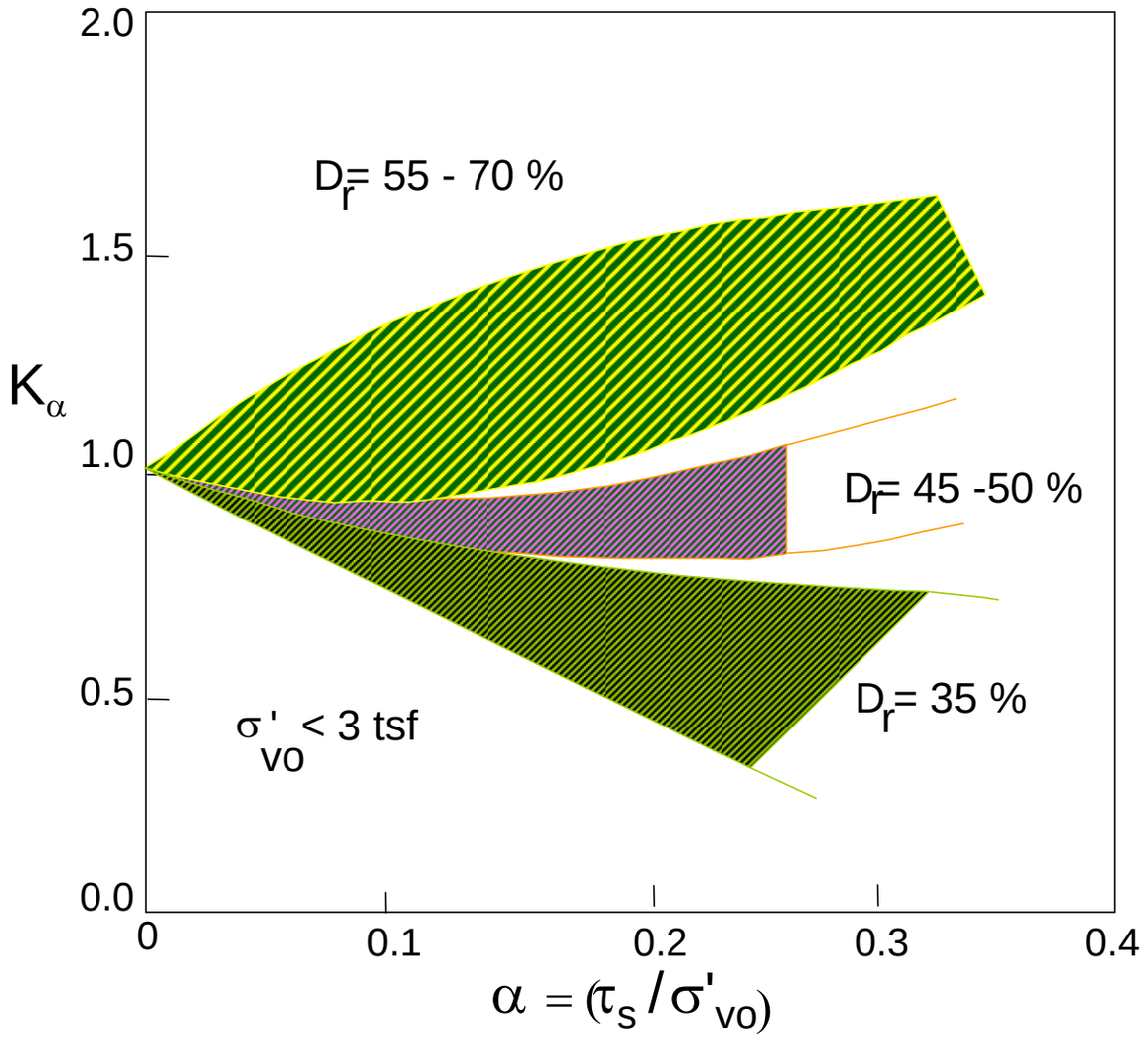


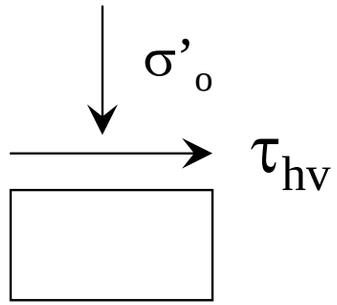


$$\alpha = \left[\frac{\tau_{hv}}{\sigma_o'} \right]$$

Ref. (Seed y Harder, 1990)

Corrección por Esfuerzo Cortante (Boulanger et al., 1991)

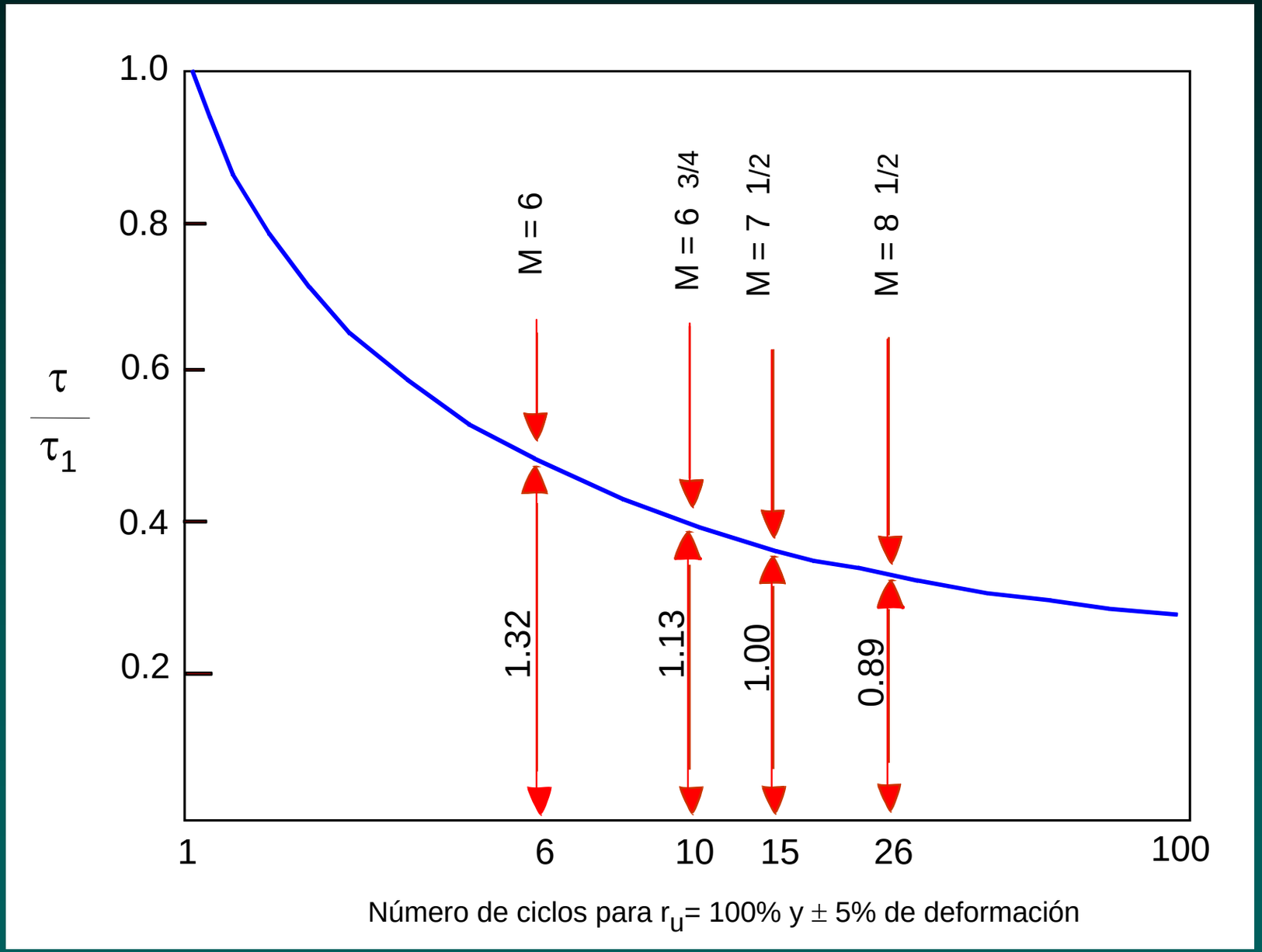




$$\alpha = \left[\frac{\tau_{hv}}{\sigma'_o} \right]$$

Ref. (Seed y Harder, 1990)

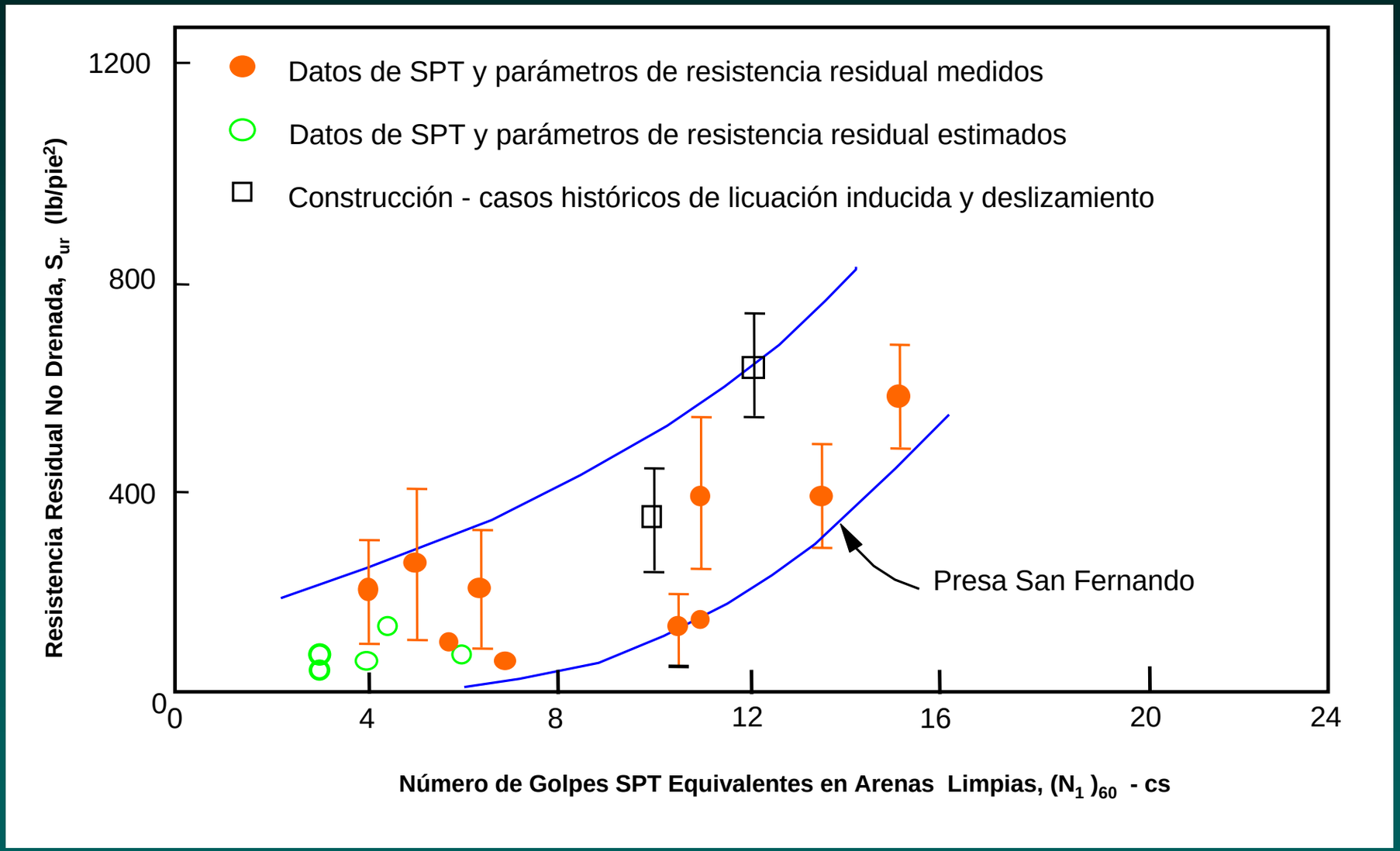
Corrección por Magnitud Km (Seed e Idriss, 1982)



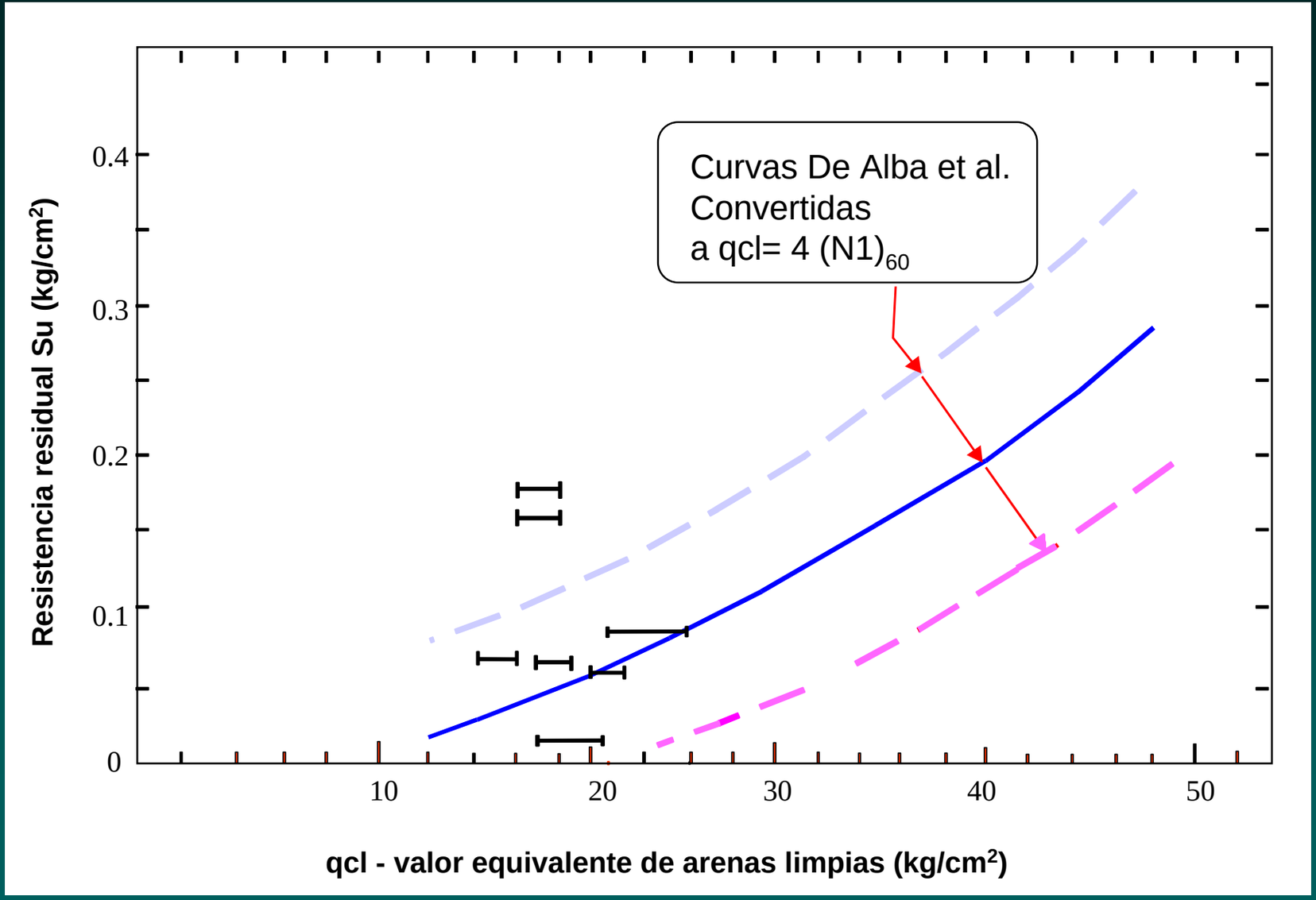
DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA RESIDUAL

- Relación entre N y Sr (Seed)
- Relación entre $\bar{\sigma}$ y Sr $Sr = C\bar{\sigma}$ C = 0.1 (Finn)
- Relación entre qc y Sr (Ishihara)

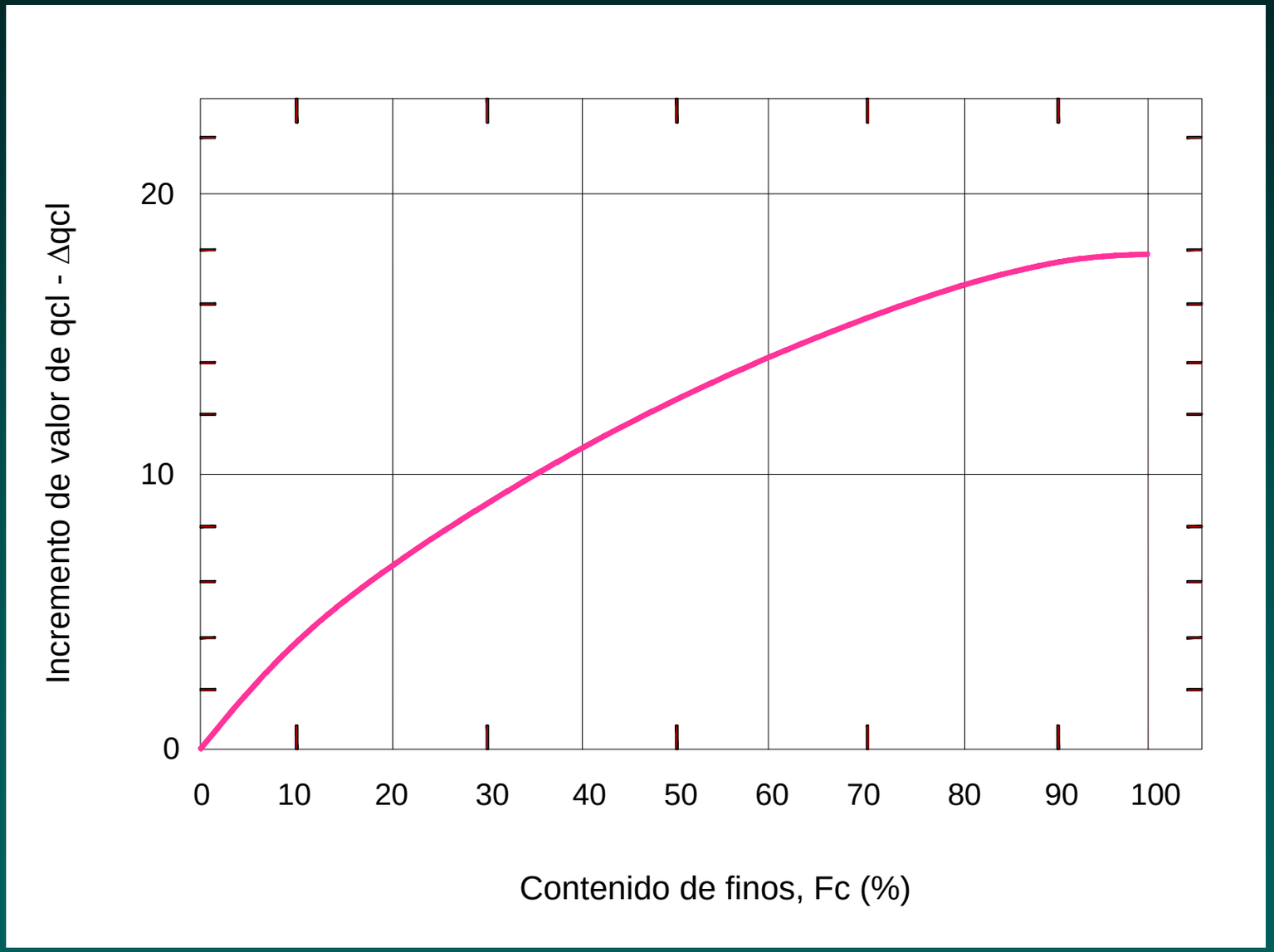
Correlación entre la Resistencia Residual y el Valor de $(N_1)_{60}$ (Seed y Harder, 1990)



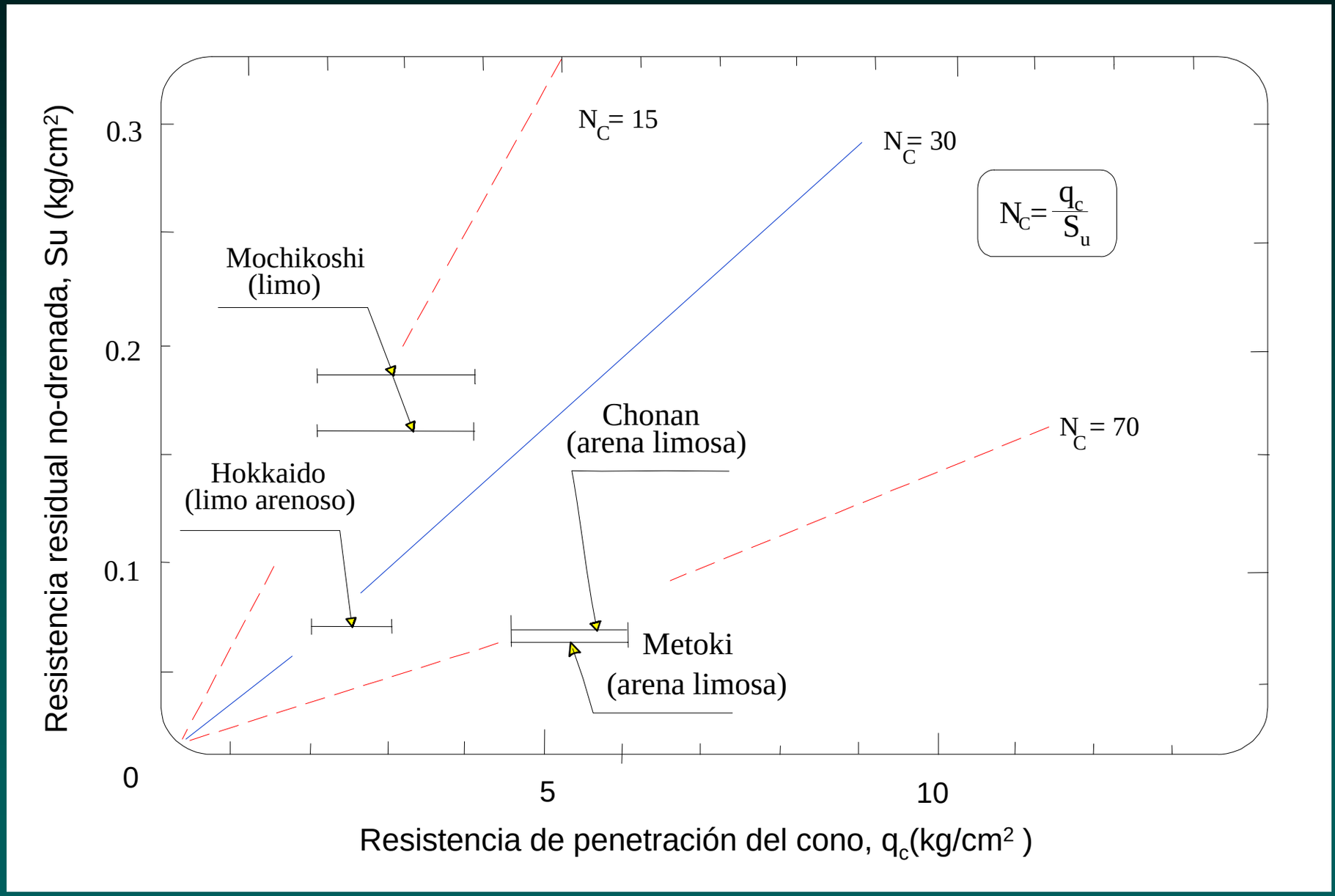
Resistencia Residual vs. qcl Equivalente de Arenas Limpias



Relación Entre Contenido de Finos e Incrementos de Qcl



Correlación entre la Resistencia Residual y Resistencia del Cono Holandés



(Ishihara, 1992)

ANÁLISIS SÍSMICO DE PRESAS DE RELAVE

1) Análisis pseudo-estático con coeficiente lateral sísmico cuando no existen presiones de poro ni degradación de propiedades

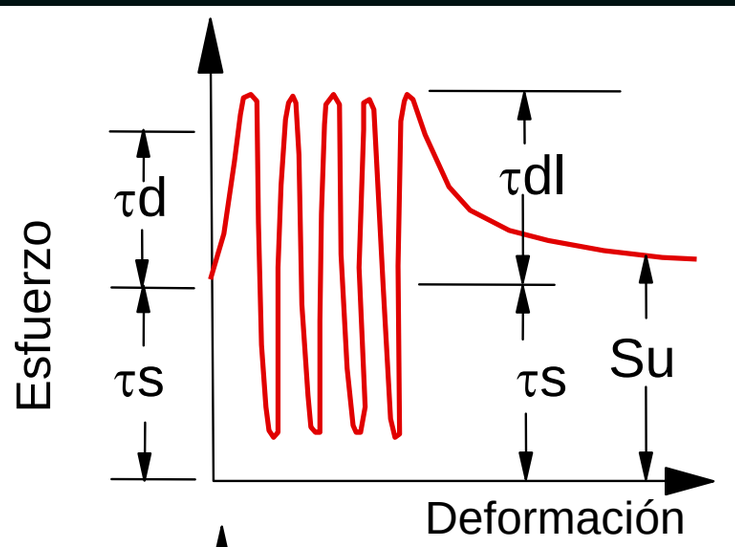
2) Método lineal equivalente con ensayos de laboratorio cuando se generan presiones de poro

3) Análisis "directo y fundamental" en problemas complejos

Análisis Post-licuación

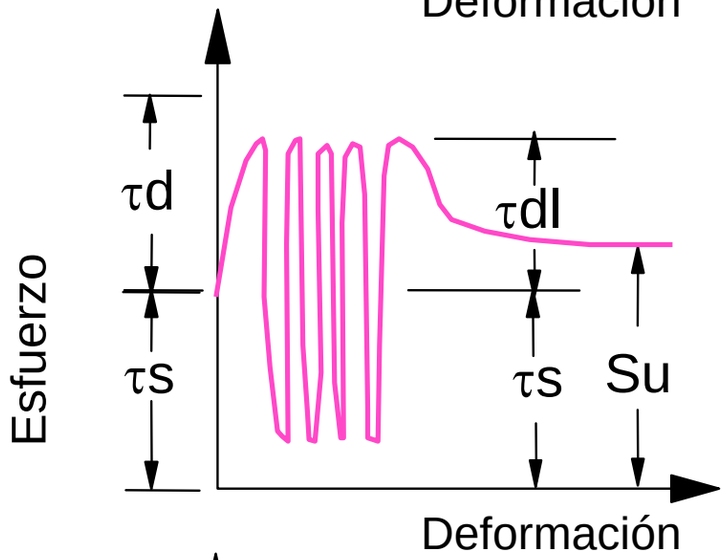
- Utilizar equilibrio límite con resistencia residual de las zonas licuadas. Lograr FS= 1.1 a 1.2

- Evaluar las deformaciones por licuación



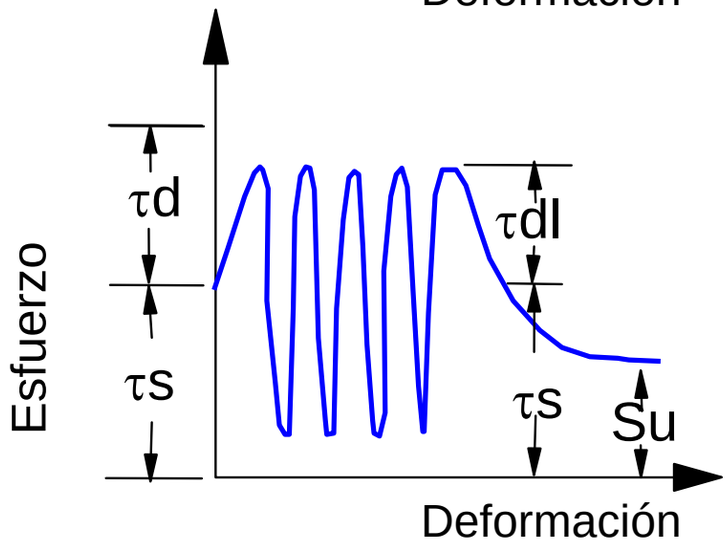
a) $\tau d < \tau dl$
$\tau s \leq Su$
$\geq$

Deformación ligera
(Sin daño)



b) $\tau d \geq \tau dl$
$\tau s \leq Su$

Deformación limitada
(Daño moderado)



c) $\tau d \geq \tau dl$
$\tau s > Su$

Deformación ilimitada
(Daño considerable)

VERIFICACIÓN DE ESTABILIDAD Y EXTENSIÓN DE LA DEFORMACIÓN

ESTABILIDAD DINÁMICA
Depósitos Inactivos

- Análisis de estabilidad pseudo-estático

  Coeficiente sísmico (1/2 - 1/3) a_{max}

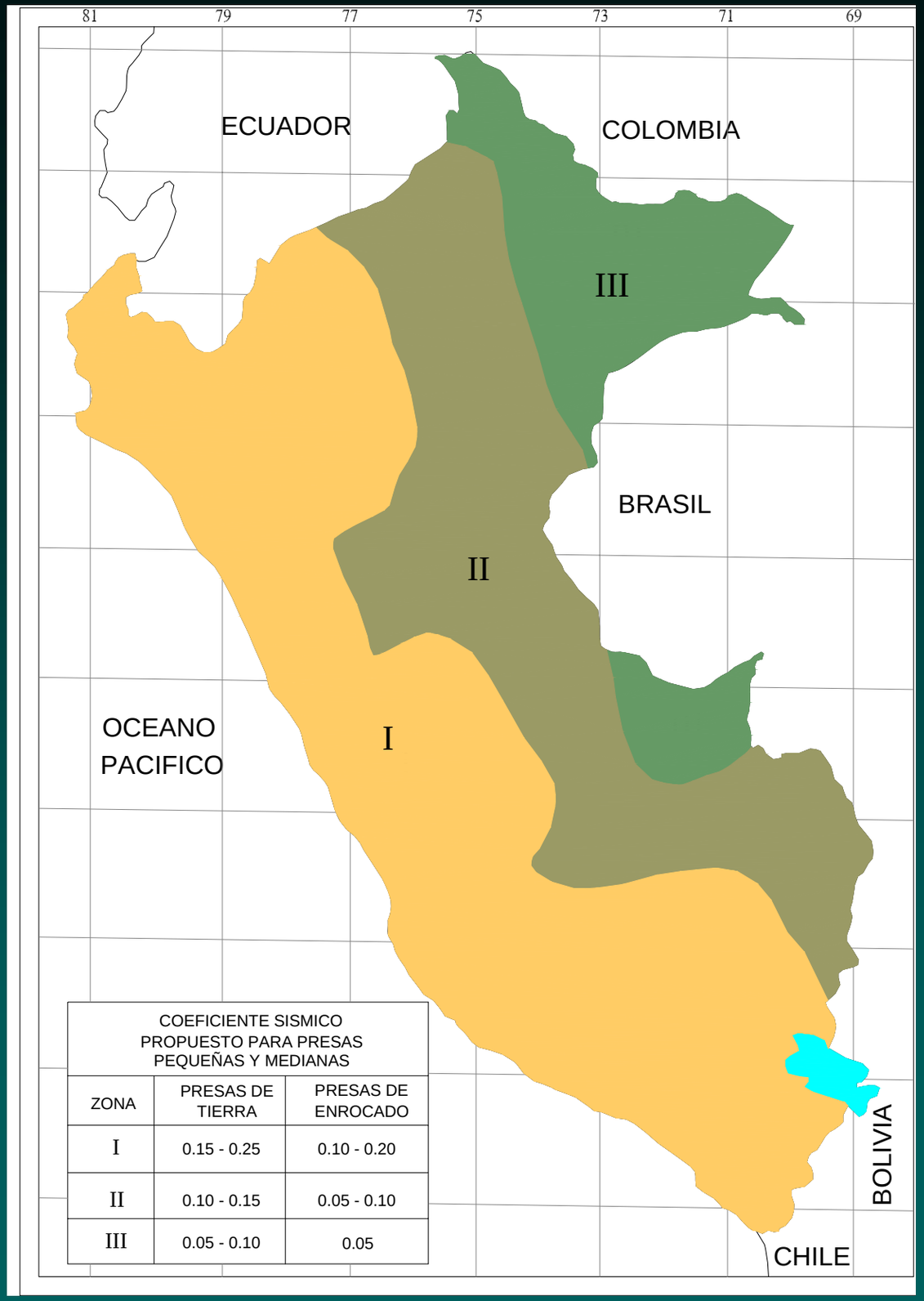
  Método de equilibrio límite

  FS > 1.0

- Deformación permanente

  Método de Makdisi y Seed

  Desplazamientos menores que 1.00 m



COEFICIENTE SISMICO
PROPUESTO PARA PRESAS
PEQUEÑAS Y MEDIANAS

ZONA	PRESAS DE TIERRA	PRESAS DE ENROCADO
I	0.15 - 0.25	0.10 - 0.20
II	0.10 - 0.15	0.05 - 0.10
III	0.05 - 0.10	0.05

(Ruesta et al, 1988)

Deformaciones Permanentes

Objetivo:

Evaluar los desplazamientos máximos debido a la ocurrencia de un terremoto especificado

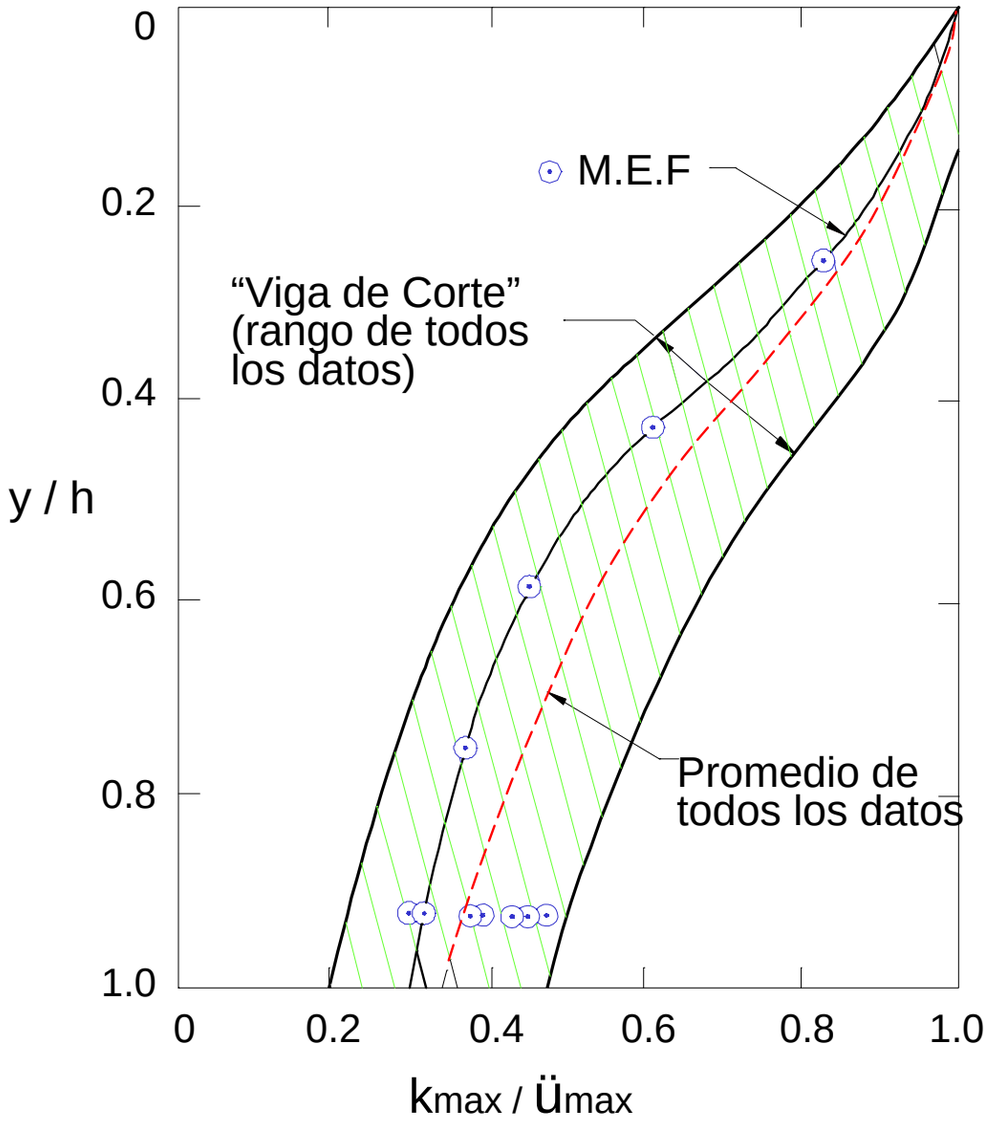
Procedimiento:

Método de Newmark (1965)

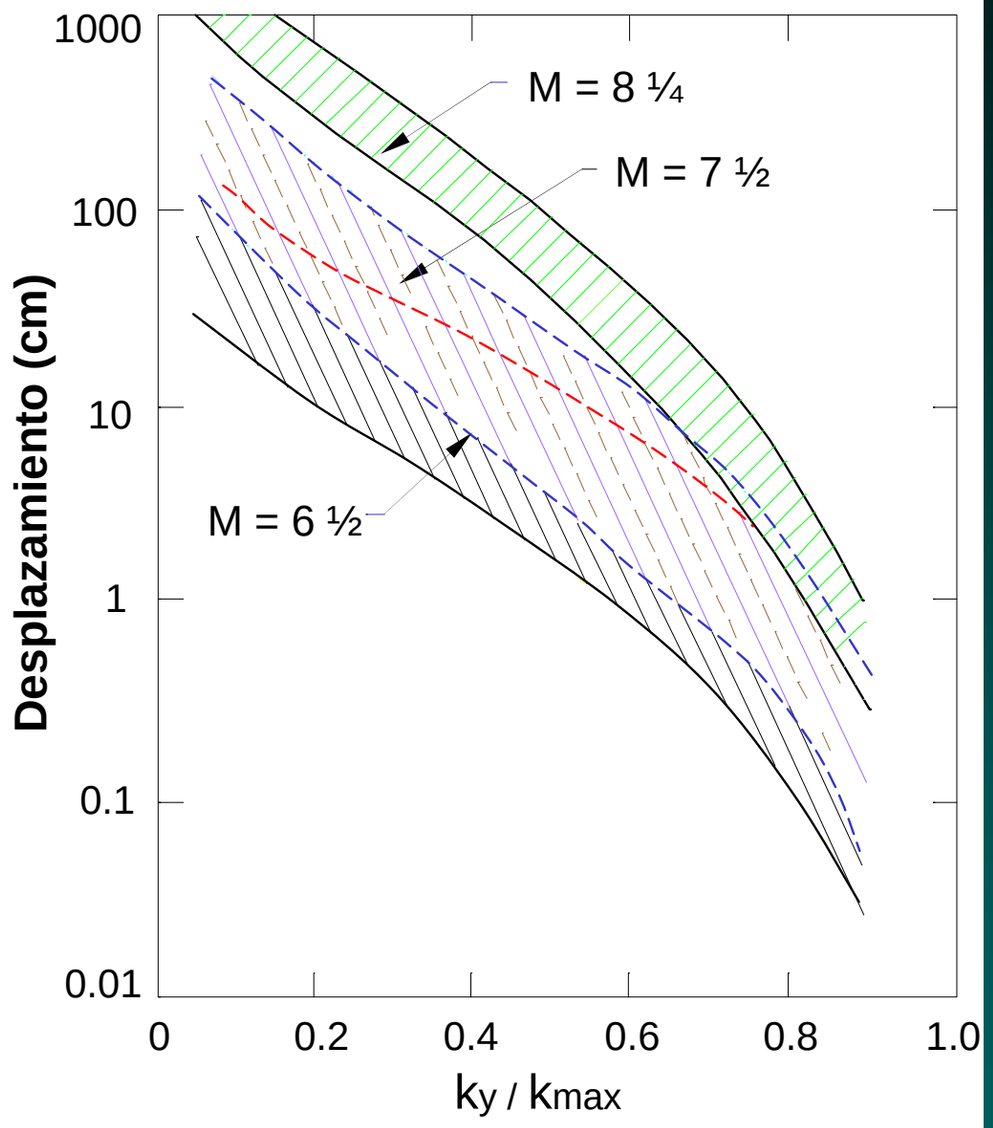
Método de Sarma (1975)

Método Simplificado de Makdisi y Seed (1978)

Cálculo de las Deformaciones Permanentes (Makdisi y Seed, 1978)



"Razón de Máxima Aceleración" vs Profundidad de la Masa Deslizante



Variación de Desplazamiento Permanente con la Aceleración de Fluencia

ESTABILIDAD DINÁMICA
Depósitos en Operación

- Análisis de respuesta dinámica
- Análisis de licuación
- Resistencia residual no drenada. S_{ur} de materiales licuados
- Análisis de estabilidad post-sismo
  FS > 1.1
- Evaluación del potencial de deformación
  Deformaciones limitadas
  Falla por flujo

Análisis de Respuesta Dinámica

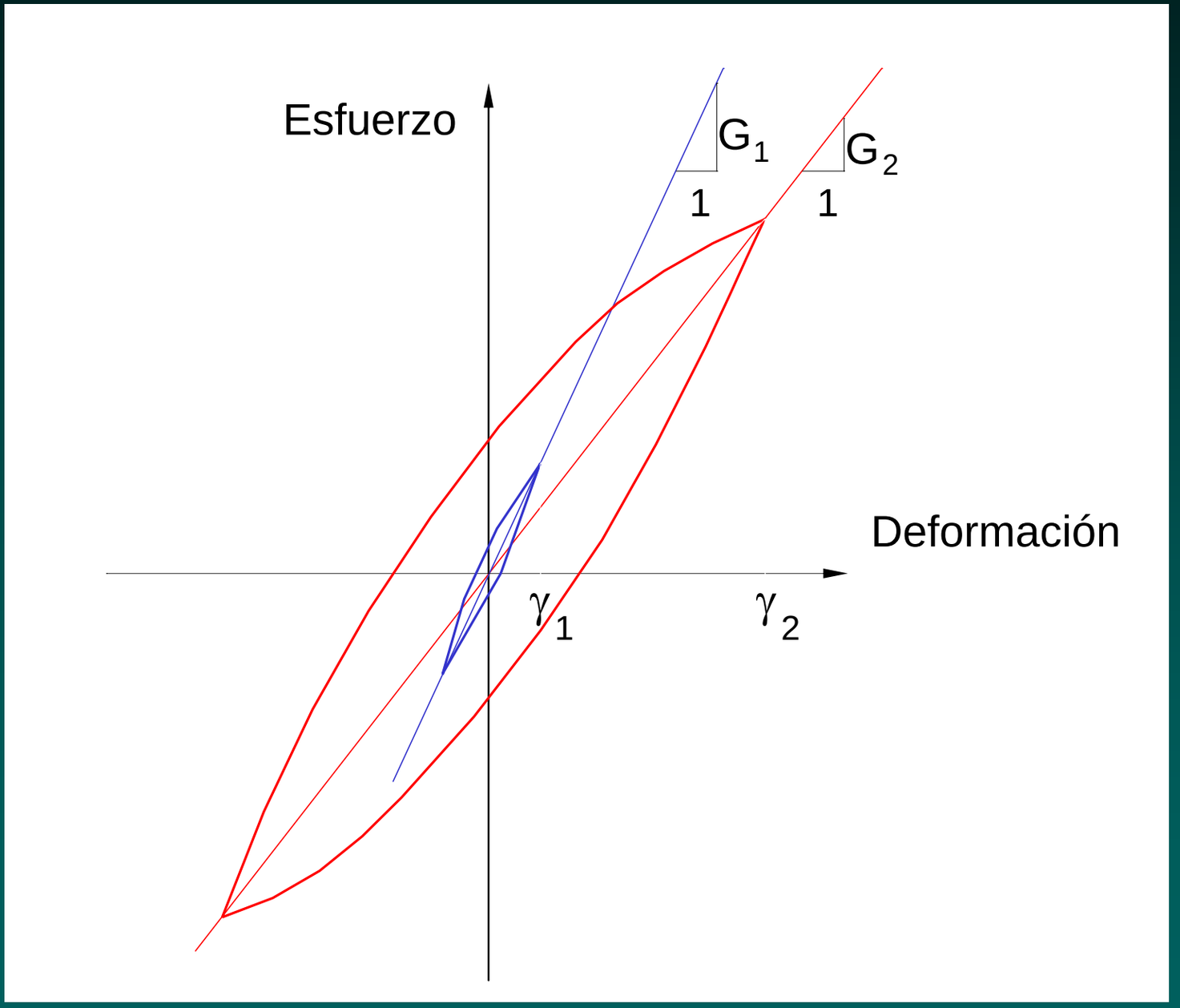
Objetivo:

- Determinación de esfuerzos de corte máximos
- Evaluación de la amplificación sísmica

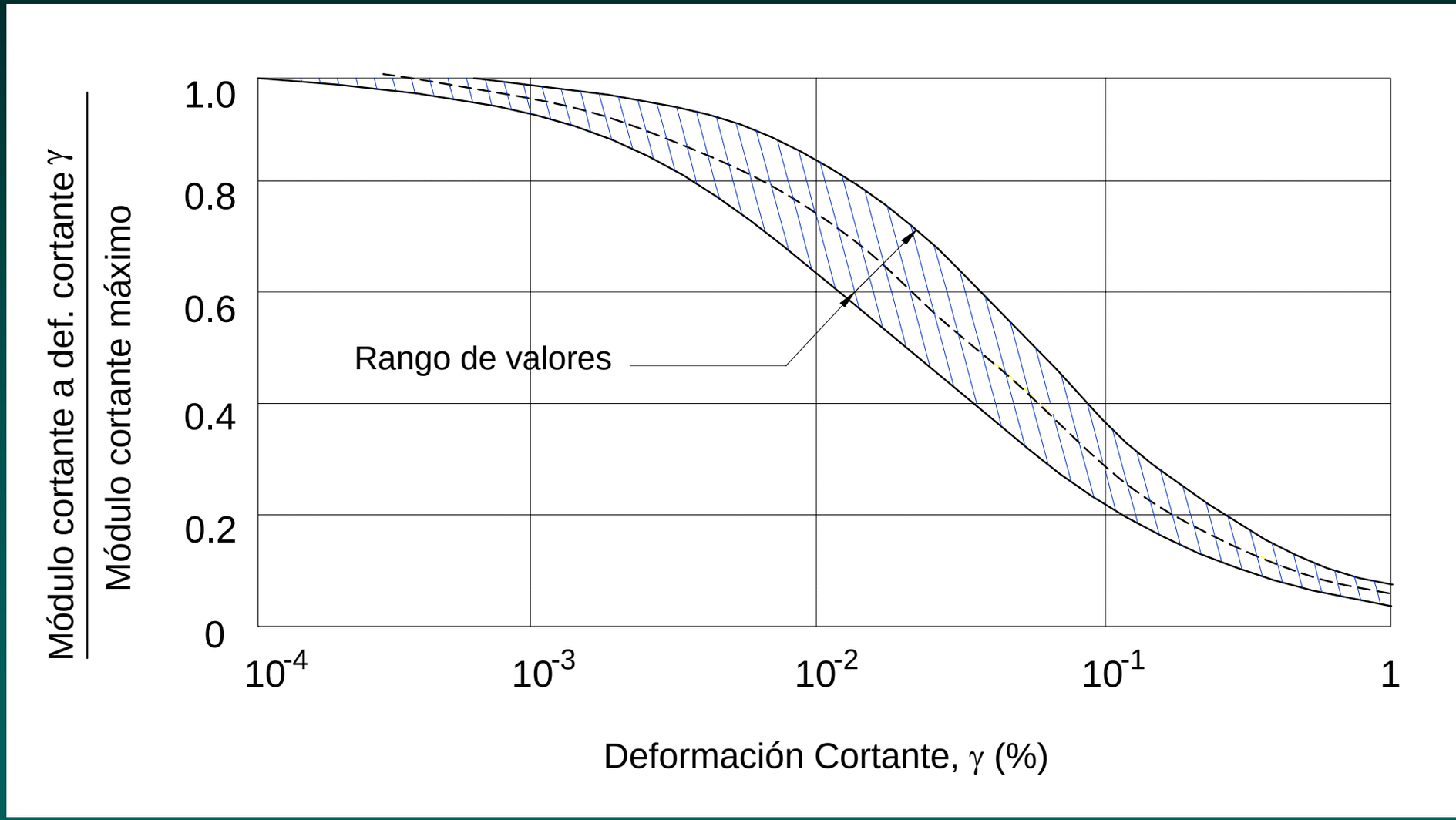
Métodos:

- Procedimientos analíticos
  SHAKE: propagación unidimensional (vertical)
- Procedimientos numéricos: elementos finitos
  QUAD4M, QUAKE/W: análisis bidimensional

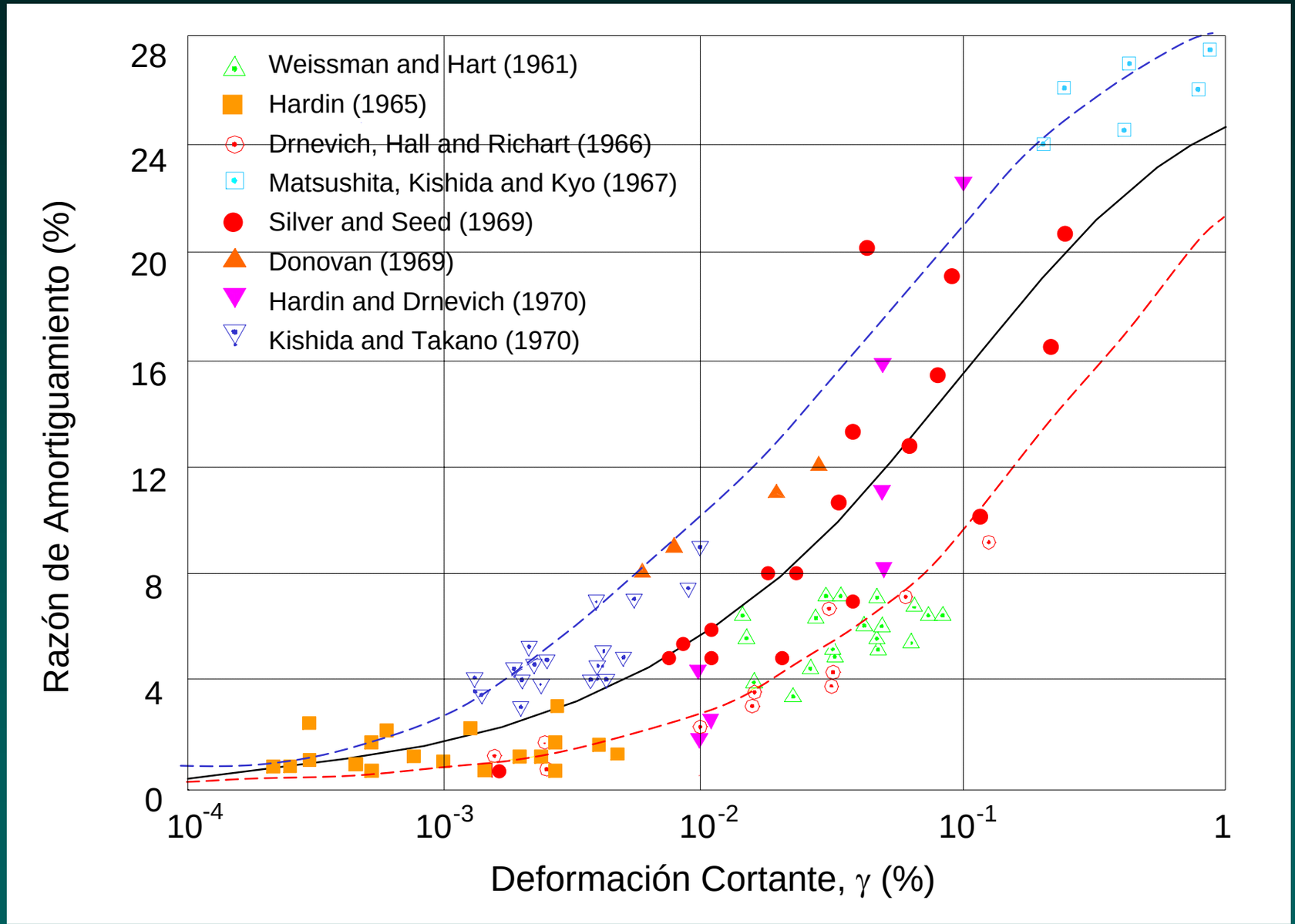
Relaciones Histeréticas
Esfuerzo - Deformación



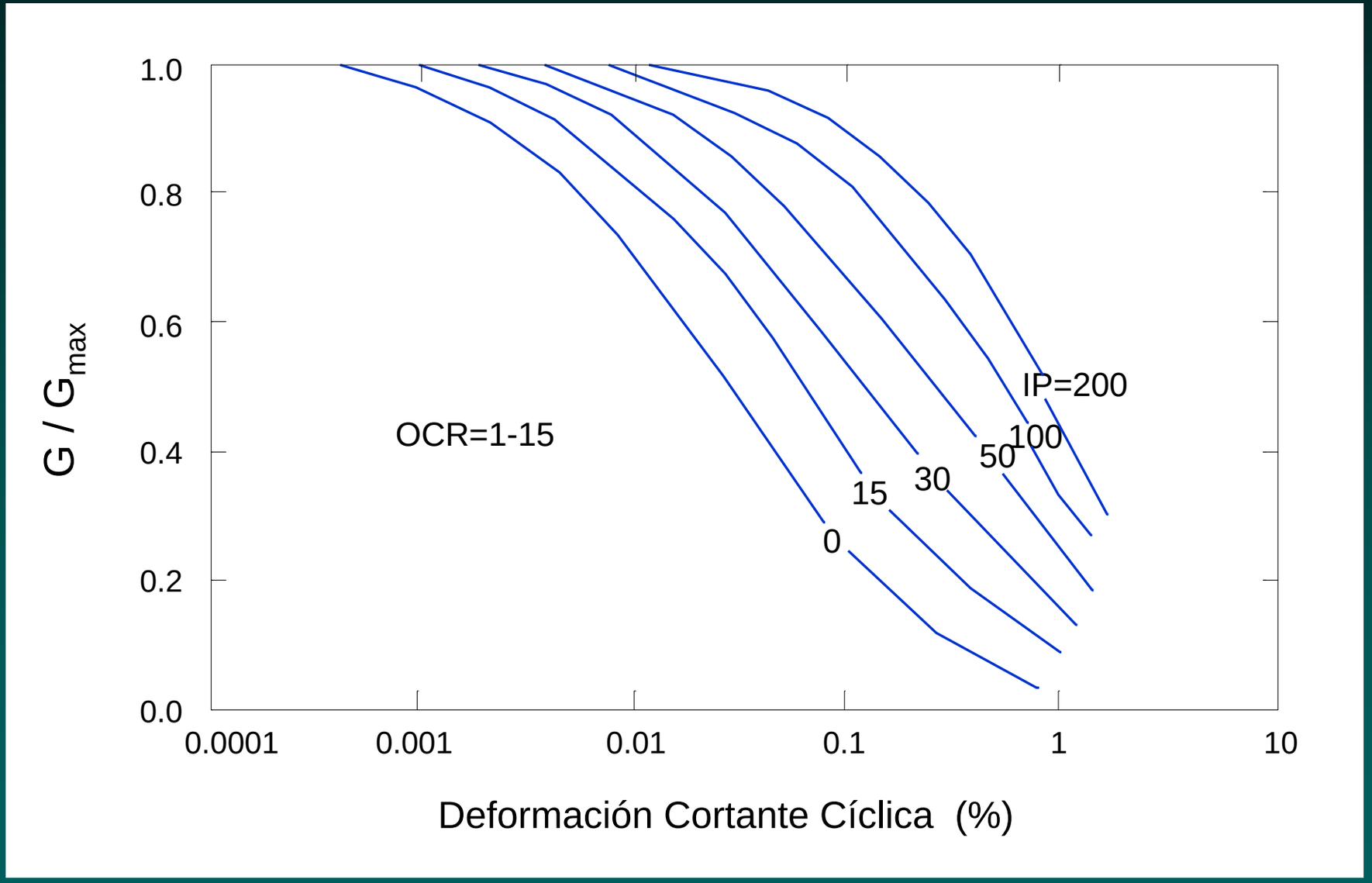
Módulo Cortante de Arenas (Seed e Idriss, 1970)



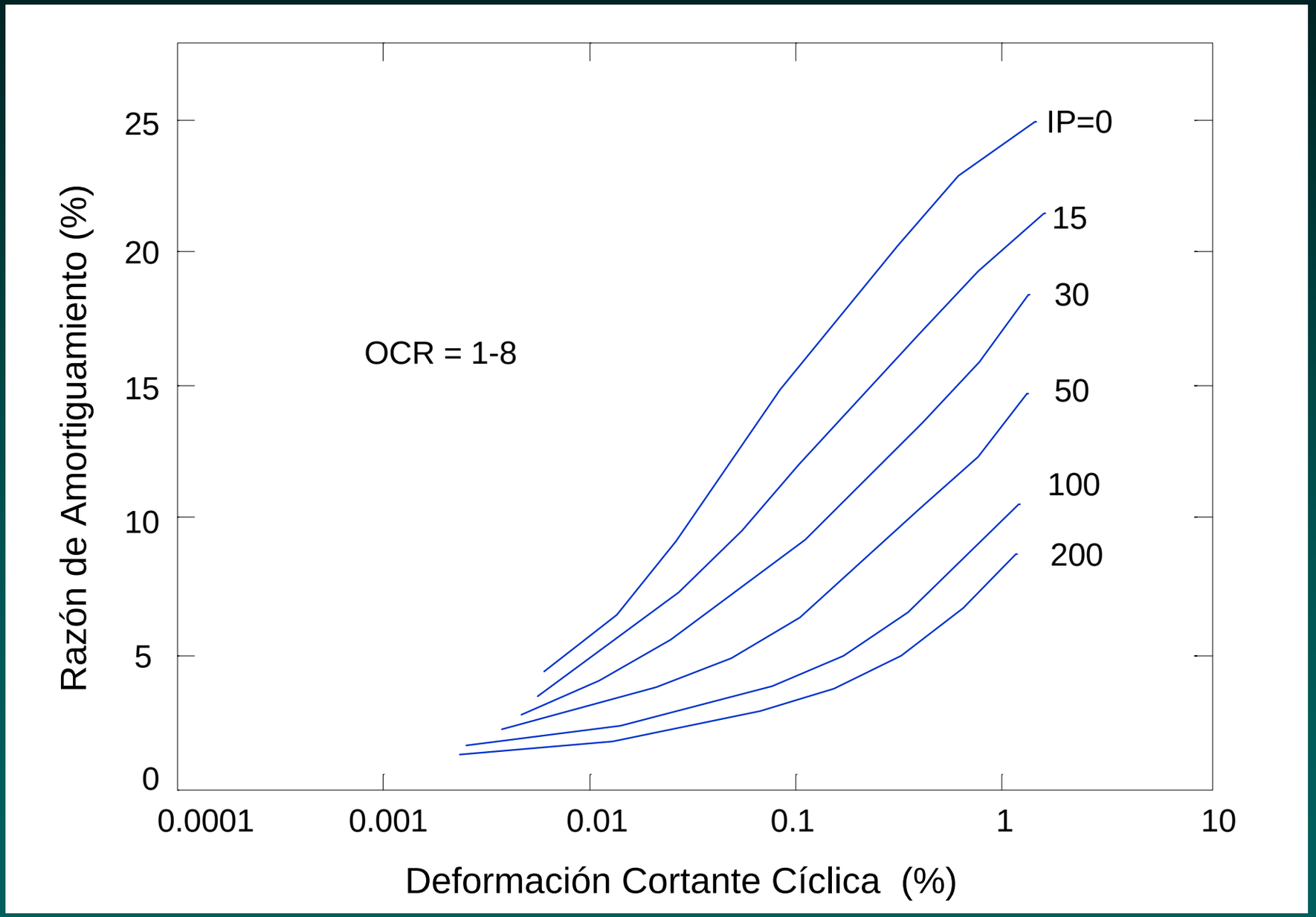
Amortiguamiento de Arenas (Seed e Idriss, 1970)



Módulo Cortante de Suelos Cohesivos (Vucetic y Dobry, 1991)



Amortiguamiento de Suelos Cohesivos (Vucetic y Dobry, 1991)



ANÁLISIS DE ESTABILIDAD POST-SISMO

- Procedimiento convencional de equilibrio límite
- Resistencia residual no drenada: suelos licuados
- Resultado: factor de seguridad estático

Propiedades de los materiales ϕ, c, S_{ur}, función del factor de resistencia a la licuación

1) FRL $\leq$ 1.1 c = Sur , $\phi = 0$

2) FRL $\geq$ 1.4 $c = K\bar{c}$, $\phi = K\bar{\phi}$, K= 75 - 85%

3) 1.1 < FRL < 1.4 condiciones intermedias

Evaluación del Potencial de Deformación

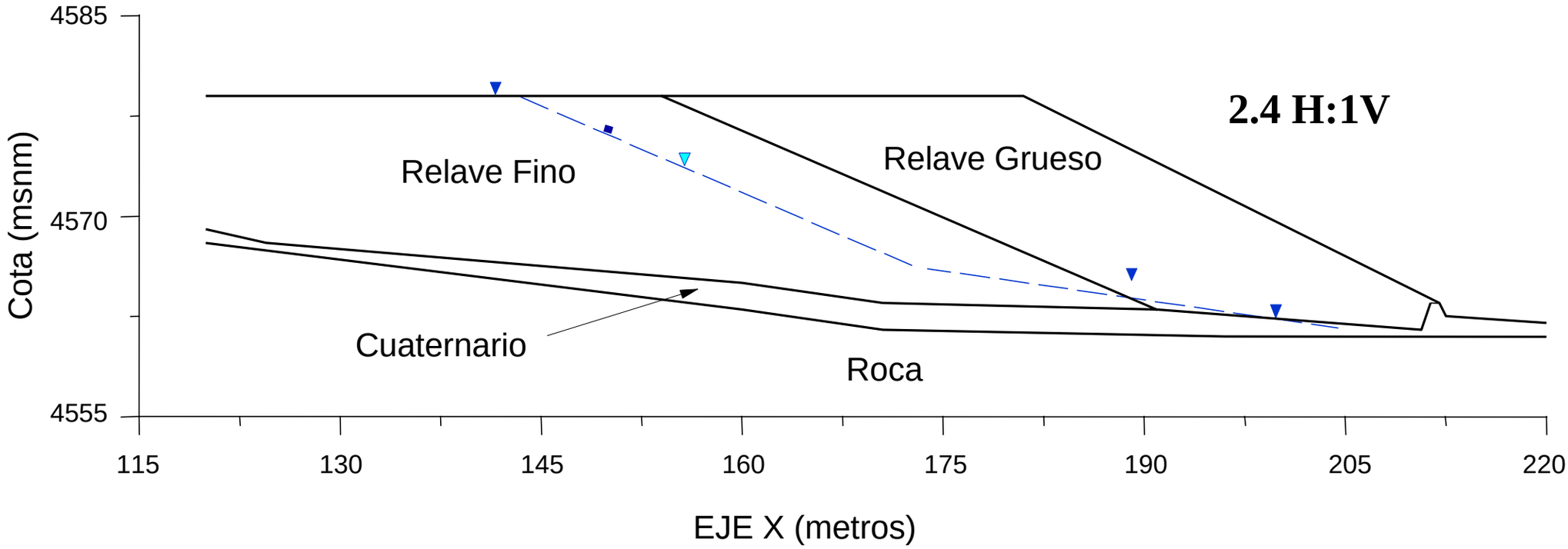
Etapa	Evaluación de licuación	Licuación	Evaluación de Deformación	Deformación	Daño
I Ocurrencia o no de licuación	$\tau_d < \tau_{dl}$	No ocurre	--	Ligera	No existe
	$\tau_d \geq \tau_{dl}$	Ocurre	--	Grande	Existe
II Ocurrencia o no de falla por flujo	$\tau_d \geq \tau_{dl}$	Ocurre	$\tau_s < S_{ur}$	Limitada	Moderado
	$\tau_d \geq \tau_{dl}$	Ocurre	$\tau_s > S_{ur}$	Ilimitada	Severo

Presa de Relave Tipo Aguas Arriba en Operación

Análisis Estático de Estabilidad

Materiales	Φ °	c (kPa)	γ (kN/m³)
Material Cuaternario	32	0.0	20.0
Relave grueso	30	0.0	16.0
Relave fino	25	0.0	15.0

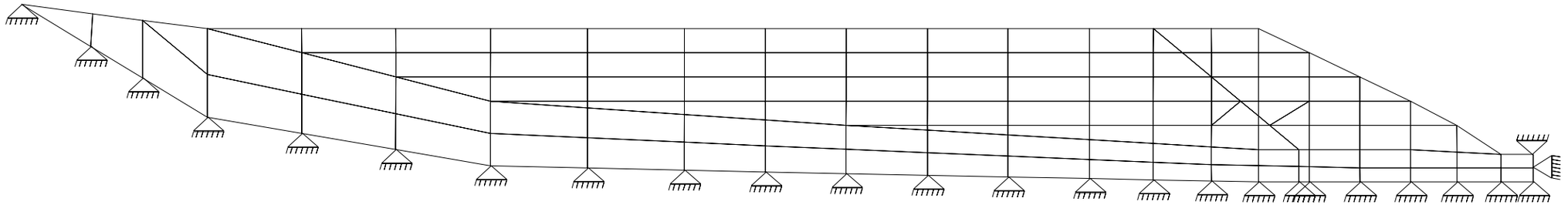
FS estático = 1.630



ANÁLISIS DINÁMICO DE RESPUESTA SÍSMICA

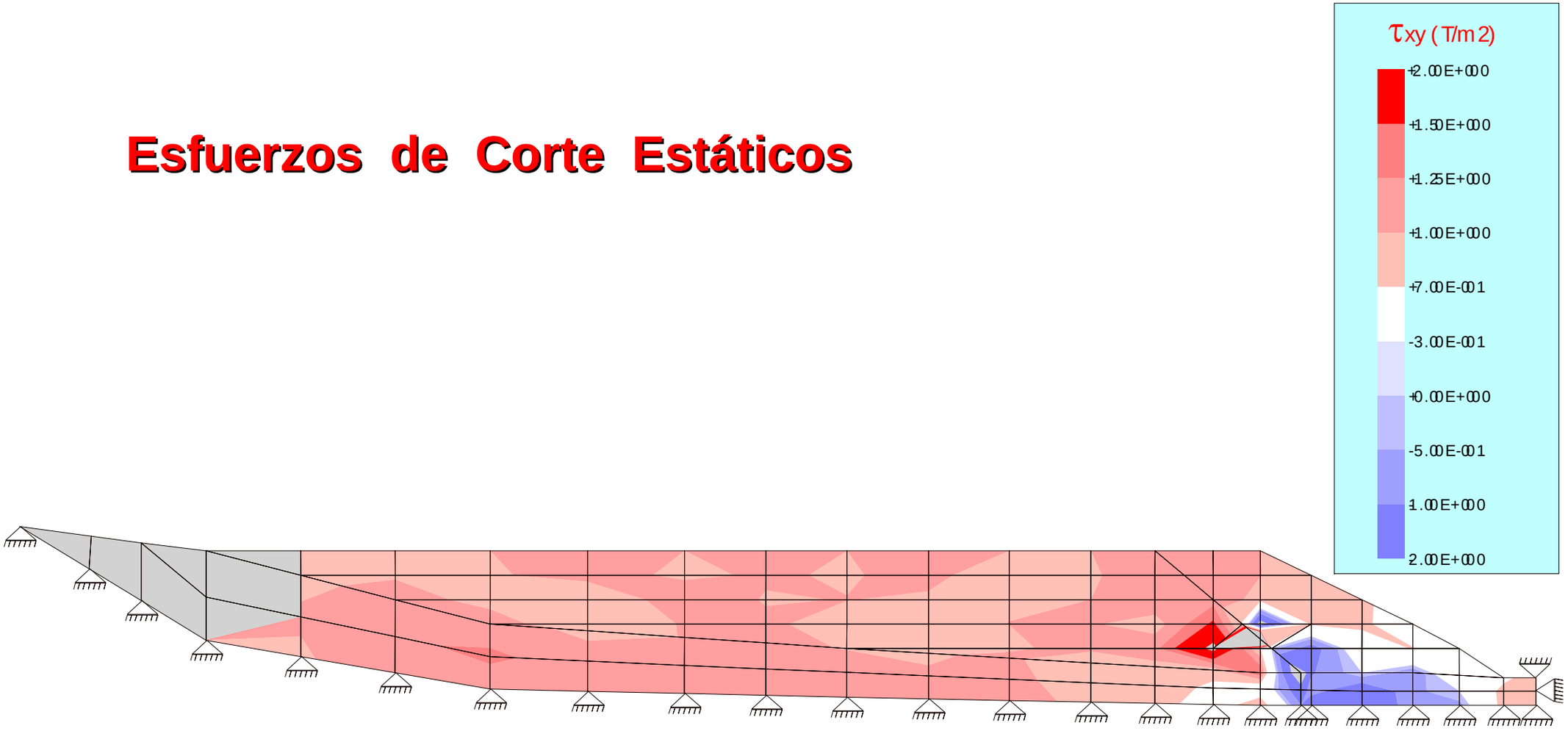
MALLA DE ELEMENTOS FINITOS

Presa de Relave Tipo Aguas Arriba en Operación



CÁLCULO DE ESFUERZOS ESTÁTICOS

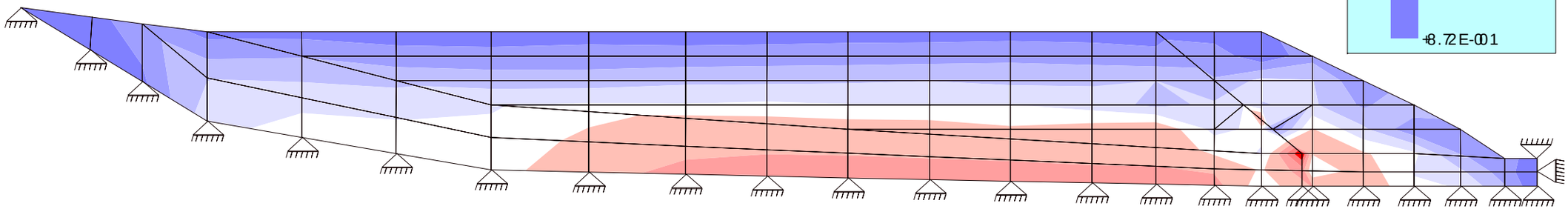
Esfuerzos de Corte Estáticos



CÁLCULO DE LA RESPUESTA SÍSMICA

Esfuerzos de Corte Máximos por Sismo

Ms = 7.5 a_{max}= 0.28 g



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE LICUACIÓN

Presa de Relave Tipo Aguas Arriba en Operación

VALOR DE LA MAGNITUD : 7.5 Ms
ACELERACION MAXIMA : 0.28 g

SONDAJE : **P-6**
NIVEL FREATICO : 12.0

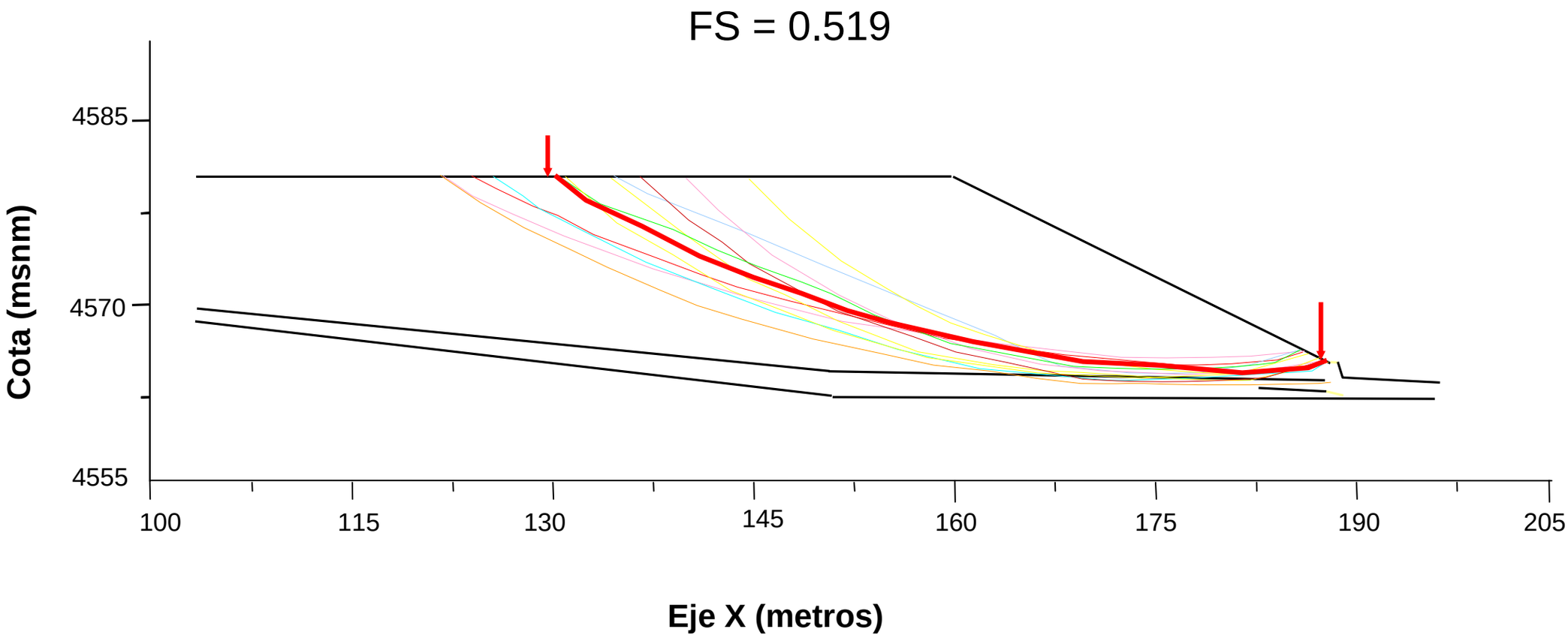
PROFUND (mt)	CLASIF (sucs)	DENSIDAD (Ton/m3)	CONT FINOS (%)	D(50) (gol/pie)	VALOR N (Kg/cm2)	ESF TOTAL (Kg/cm2)	ESF EFECT	R E C R	R E C A	F R L	F R L 1 (K_{σ}, K_{α})
1.95	SM	1.60	46.60	---	3	0.312	0.312	0.097	0.388	0.250	0.134
3.45	SM	1.60	46.60	---	2	0.552	0.552	0.075	0.360	0.208	0.146
4.95	SM	1.60	34.80	---	5	0.792	0.792	0.101	0.413	0.245	0.183
6.45	SM	1.60	34.80	---	4	1.032	1.032	0.078	0.263	0.297	0.255
7.95	SM	1.60	34.80	---	6	1.272	1.272	0.096	0.209	0.459	0.437
9.45	ML	1.50	54.70	---	7	1.508	1.508	0.103	0.225	0.458	0.396
10.95	SM	1.60	34.80	---	7	1.737	1.737	0.096	0.278	0.345	0.983
12.45	ML	1.50	54.70	---	9	1.973	1.928	0.117	0.110	1.060	0.871
13.95	ML	1.50	54.70	---	3	2.197	2.003	0.079	0.107	0.738	0.651

RESISTENCIA RESIDUAL NO-DRENADA

Material	Resistencia Residual (kPa)
Relave Grueso	11 – 13
Relave Fino	5 – 8

A partir del ensayo de penetración estándar (SPT)

Análisis de Estabilidad Post-Sismo



EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE DEFORMACIÓN

Condición	Licuación	Deformación	Daño
$\tau_d > \tau_{dl}$ y $\tau_s < S_{ur}$	Existe	Limitada	Moderado

Conclusiones:

depósito inestable, sin embargo se presentarán deformaciones limitadas y el daño será moderado

Normas para Análisis de Estabilidad de Presas de Relaves Emitidas por el Gobierno Peruano

RD 440-96-EM/DGM

- Estudios para estabilización de presas de relaves

RD 224-97-EM/DGM

- Evaluación especial de la estabilidad física

RD 19-97-EM/DGAA

- Estructura del reporte de estabilidad física de presas de relaves
- Períodos de retorno de sismos: 150 años para depósitos operativos y 500 años para depósitos inactivos

MEDIDAS DE REMEDIACIÓN PARA MEJORAR LA SEGURIDAD

- Reemplazo por presa nueva

- Mejora de la presa existente

  a) Predicción del comportamiento sísmico

  b) Naturaleza del defecto de la presa

     Zonas sueltas y licuables
     Nivel freático alto
     Taludes empinados
     Ancho de playa

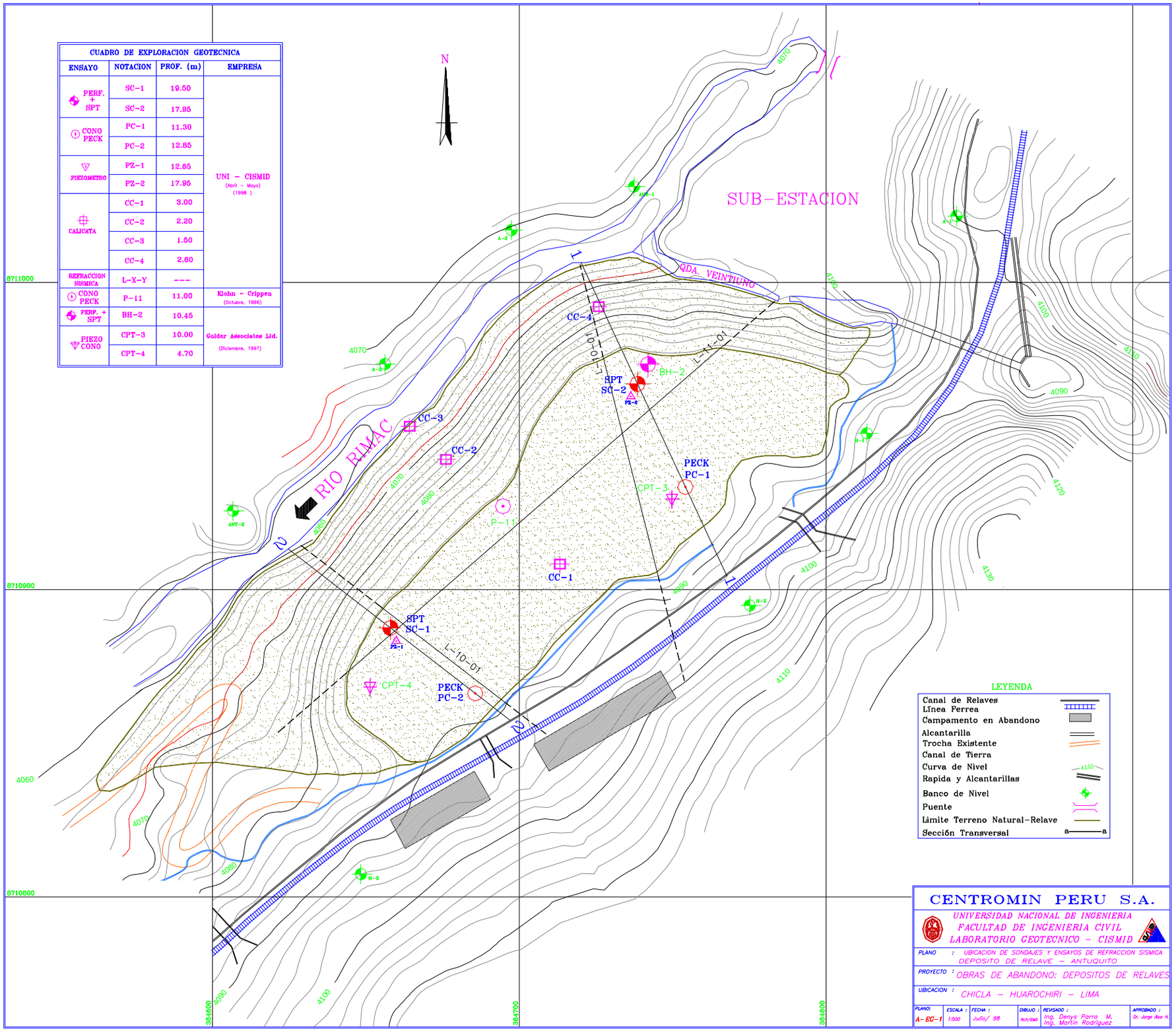
  c) Tamaño relativo de la presa actual y final

     Mejora en la operación del relave
     Mejora en el talud aguas abajo
     Densificación de la zona suelta

- Protección del área aguas -abajo

(ICOLD, 1995)

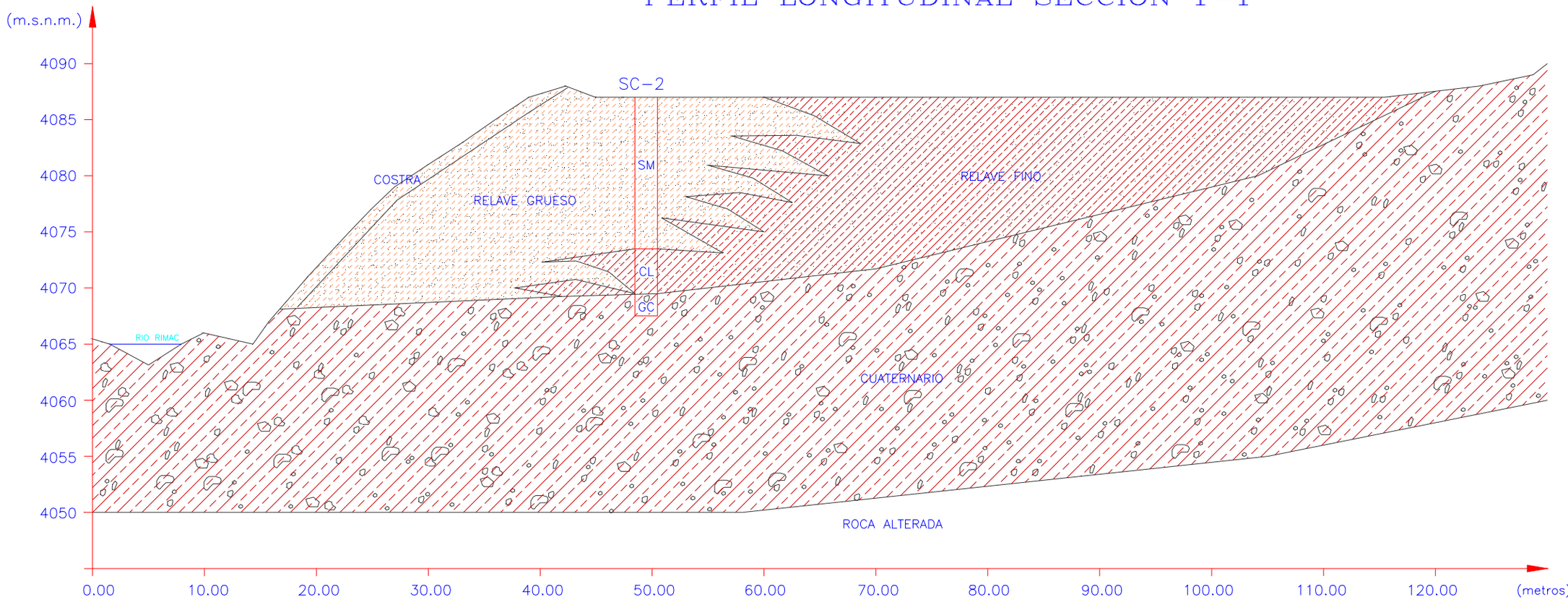
Presa de Relave Antuquito antes de la Remediación



CUADRO DE EXPLORACION GEOTECNICA

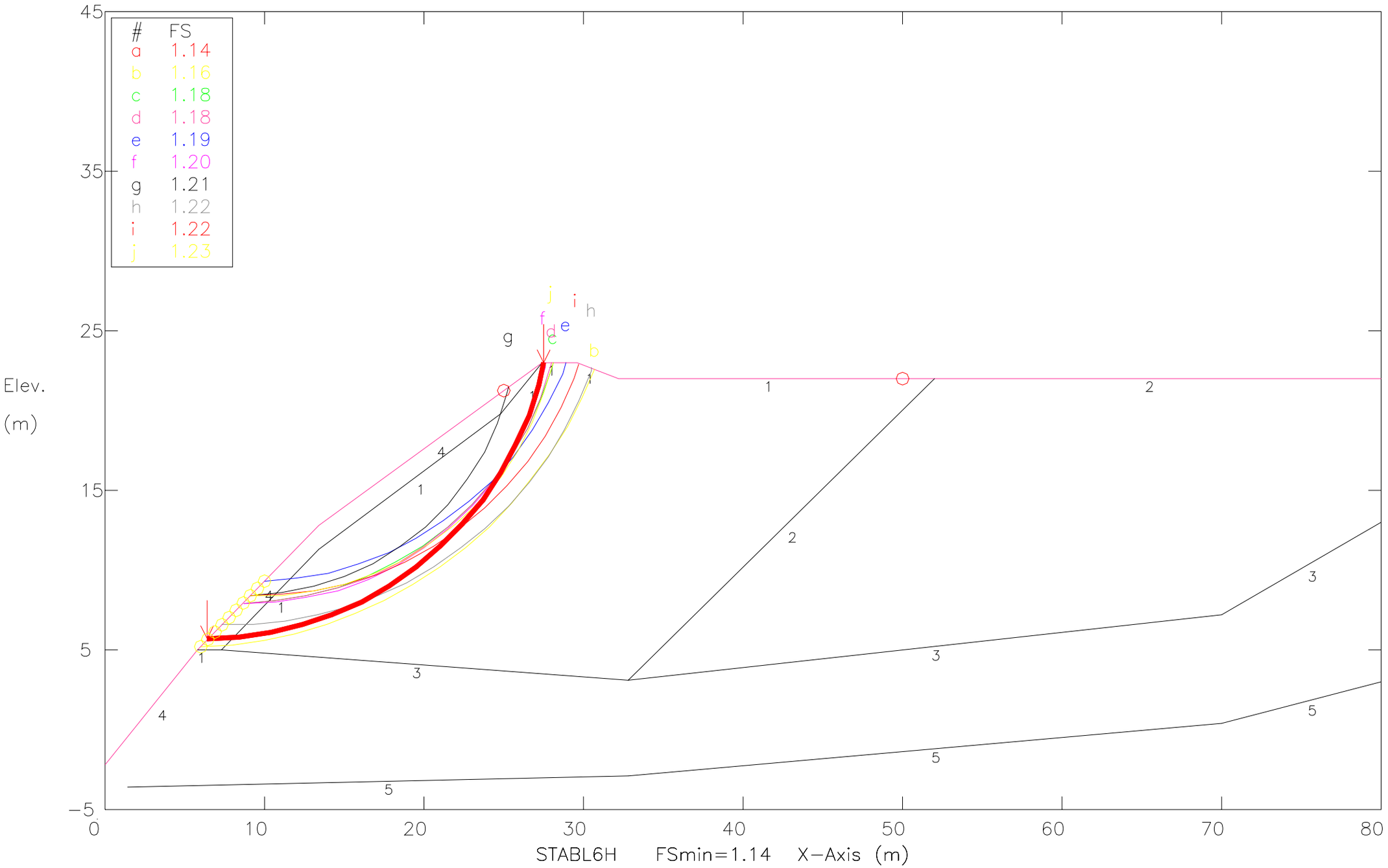
ENSAYO	NOTACION	PROF. (m)	EMPRESA
PERF. + SPT	SC-1	19.50	UNI - CISMID (Abril - Mayo) (1998)
	SC-2	17.95	
CONO PECK	PC-1	11.30	
	PC-2	12.85	
PIEZOMETRO	PZ-1	12.65	
	PZ-2	17.95	
CALICATA	CC-1	3.00	
	CC-2	2.20	
	CC-3	1.50	
	CC-4	2.60	
REFRACCION SISMICA	L-X-Y	---	
CONO PECK	P-11	11.00	Klohn - Crippen (Octubre, 1996)
PERF. + SPT	BH-2	10.45	Golder Associates Ltd. (Diciembre, 1997)
PIEZO CONO	CPT-3	10.00	
	CPT-4	4.70	

PERFIL LONGITUDINAL SECCION 1–1



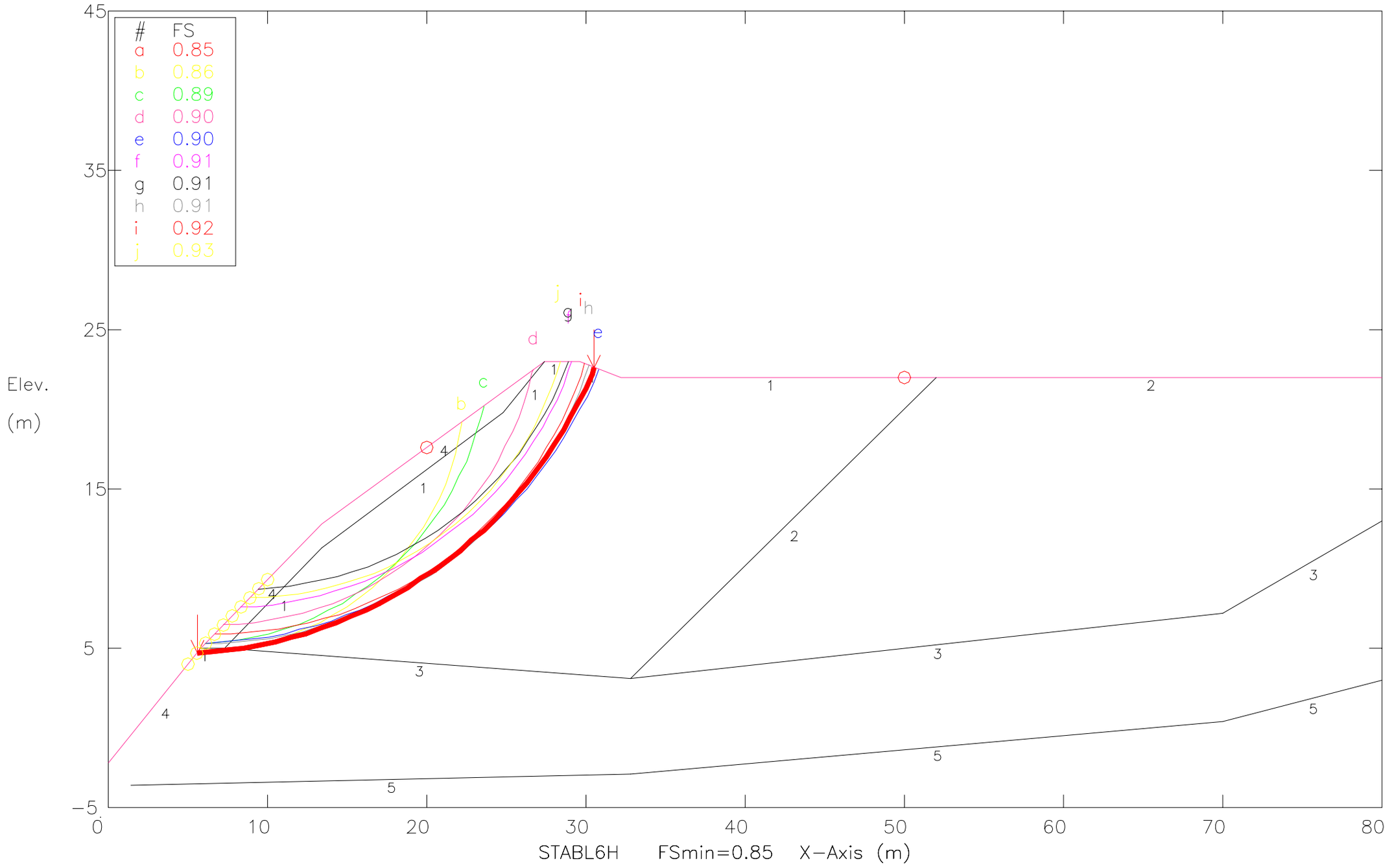
ANTUQUITO EJE 1–1 ANALISIS ESTATICO

Ten Most Critical. D:A1_E.PLT By: EM/RL 07–17–98 11:55am



ANTUQUITO EJE 1–1 ANALISIS SEUDOESTATICO

Ten Most Critical. D:A1_S.PLT By: EM/RL 07–17–98 1:15pm

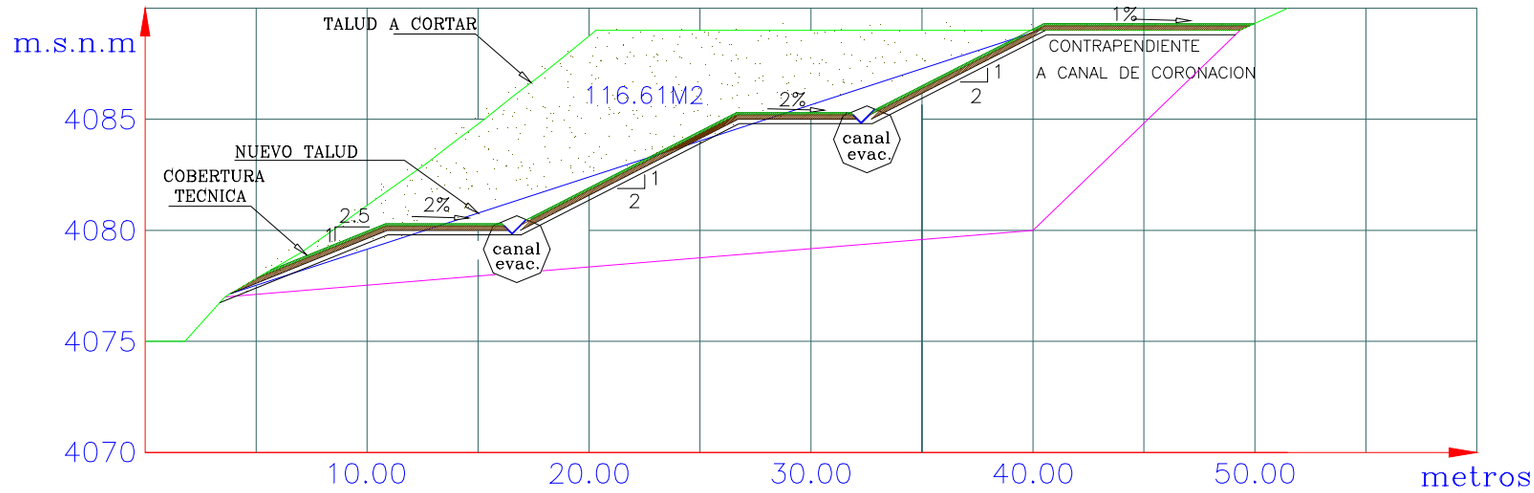


Resultados del Análisis de Estabilidad
Depósito de Relaves de Antuquito

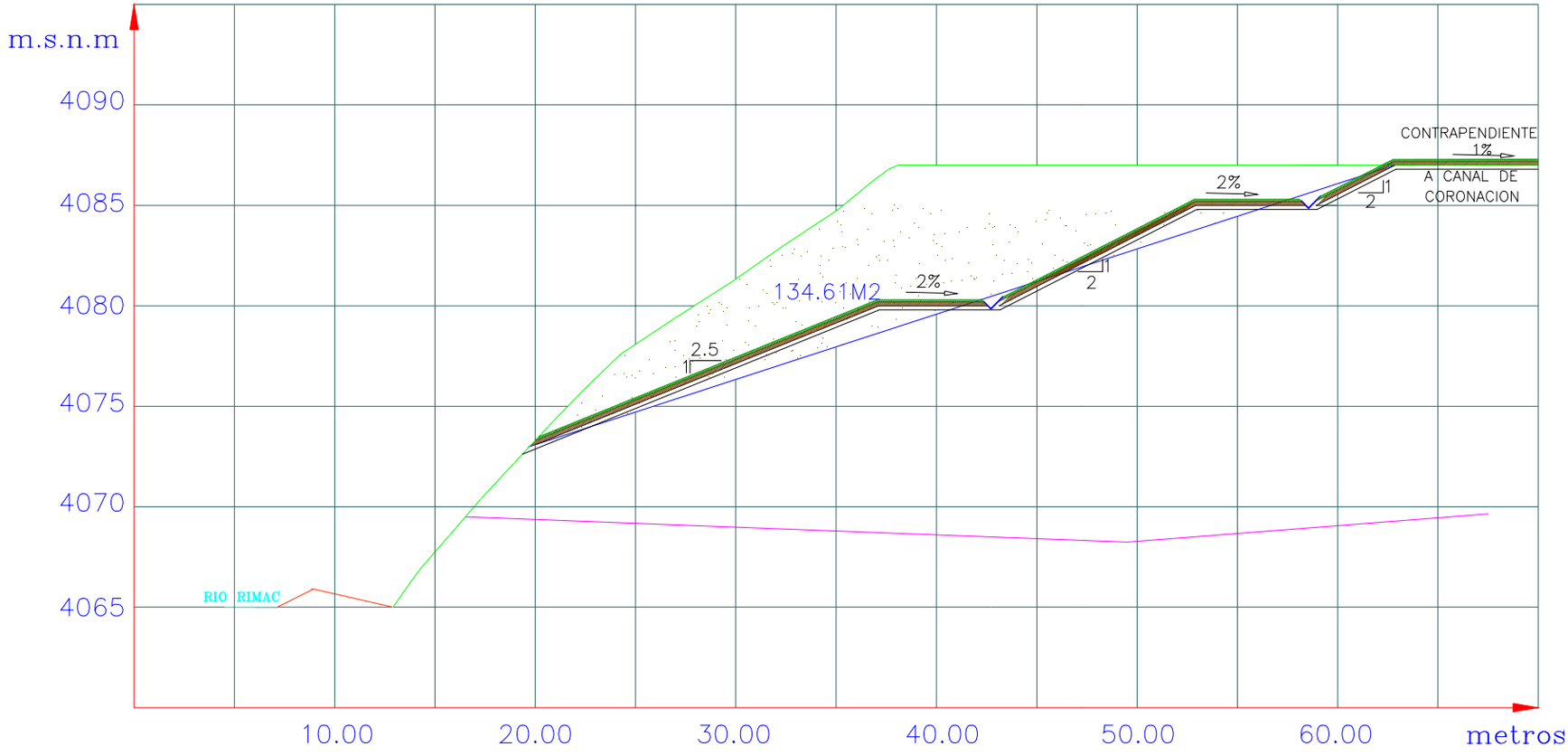
Depósito	Sección	Talud	Factores de Seguridad	
			Estático	Seudo-estático
Antuquito	1-1	Actual	**1.14**	**0.85**
	2-2	Actual	**1.12**	**0.86**

Deformaciones Permanentes: 120 cm en la superficie

Conclusiones: **precarias condiciones de estabilidad**



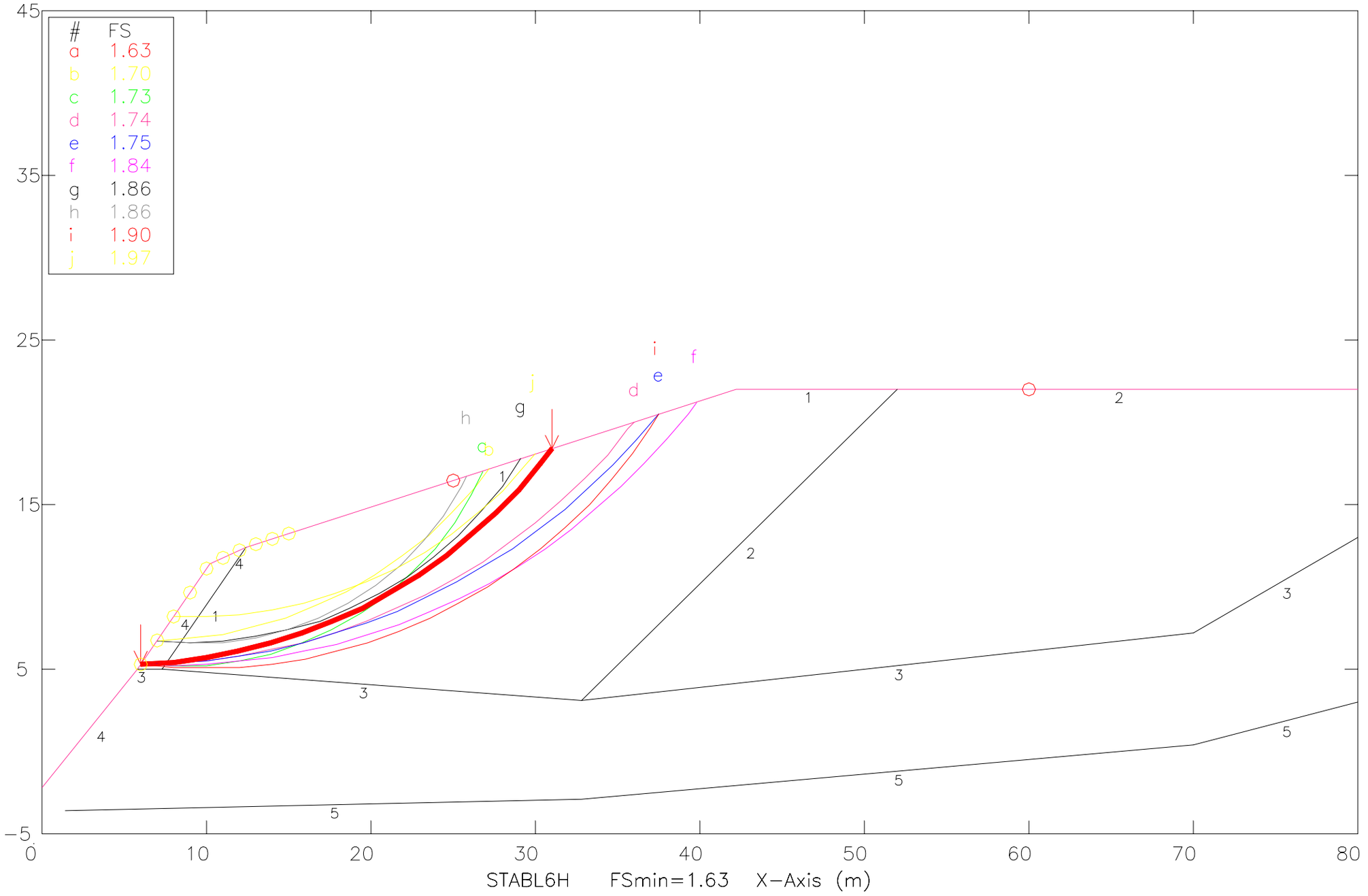
SECCION A–A



SECCION C–C

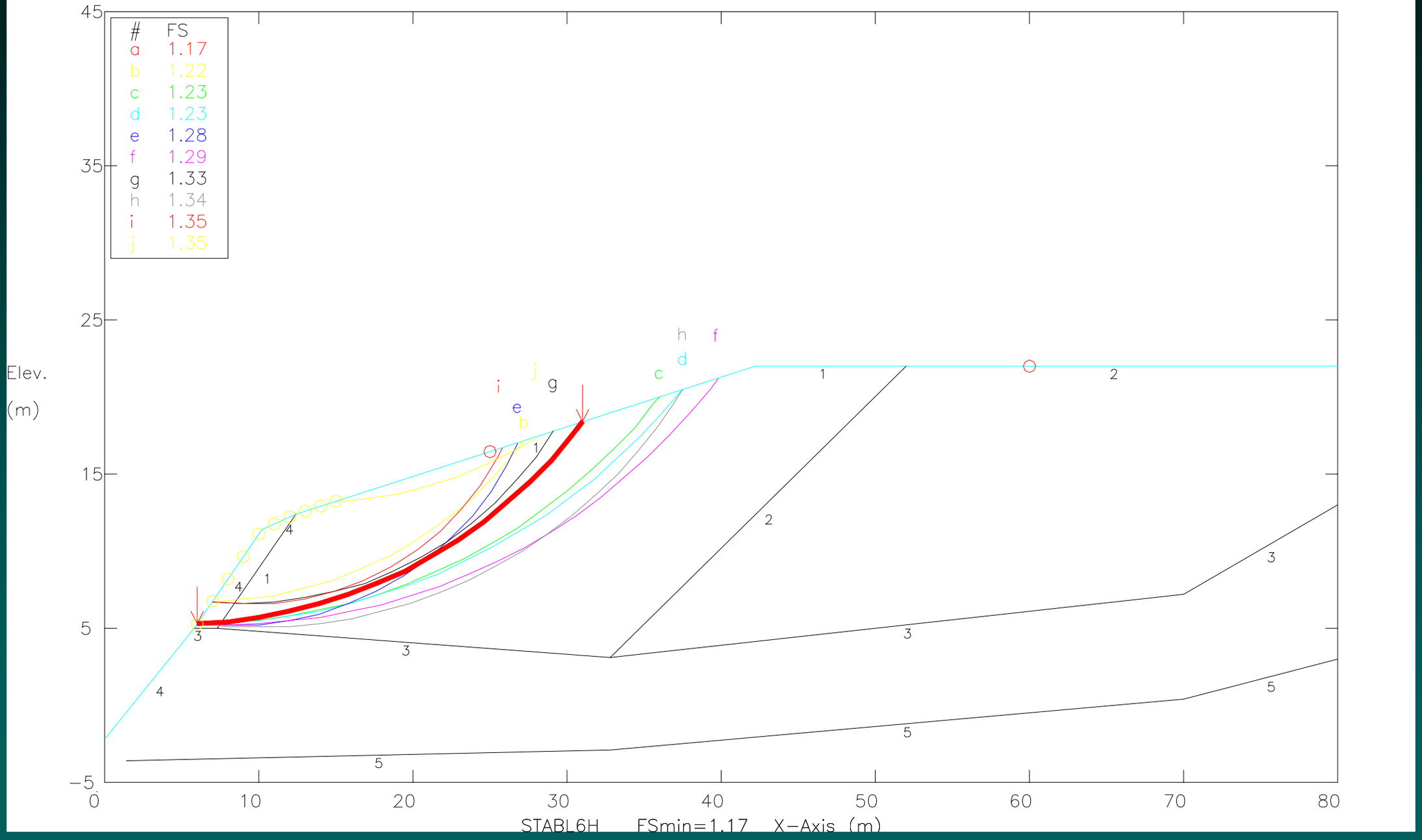
DEPOSITO DE RELAVES ANTUQUITO EJE 1-1 ANALISIS ESTATICO,SOLUCION TALUD 3H:1V

Ten Most Critical. D:A1_ME.PLT By: EM/RL 08-17-98 5:40pm



DEPOSITO DE RELAVES ANTUQUITO EJE 1-1 ANALISIS SEUDOESTATICO,SOLUCION TALUD 3H

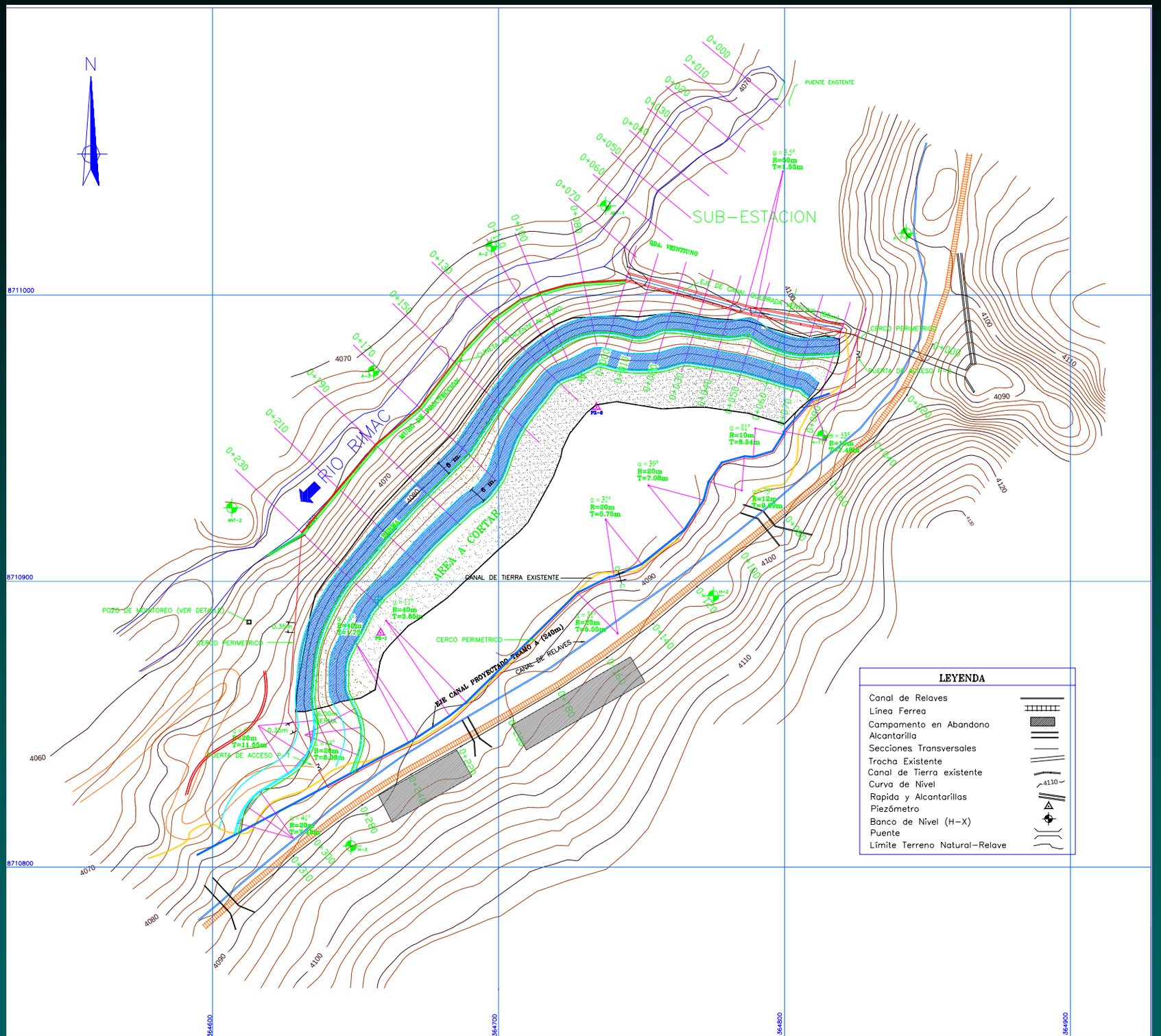
Ten Most Critical. D:A1_MS.PLT By: EM/RL 08-17-98 5:41pm



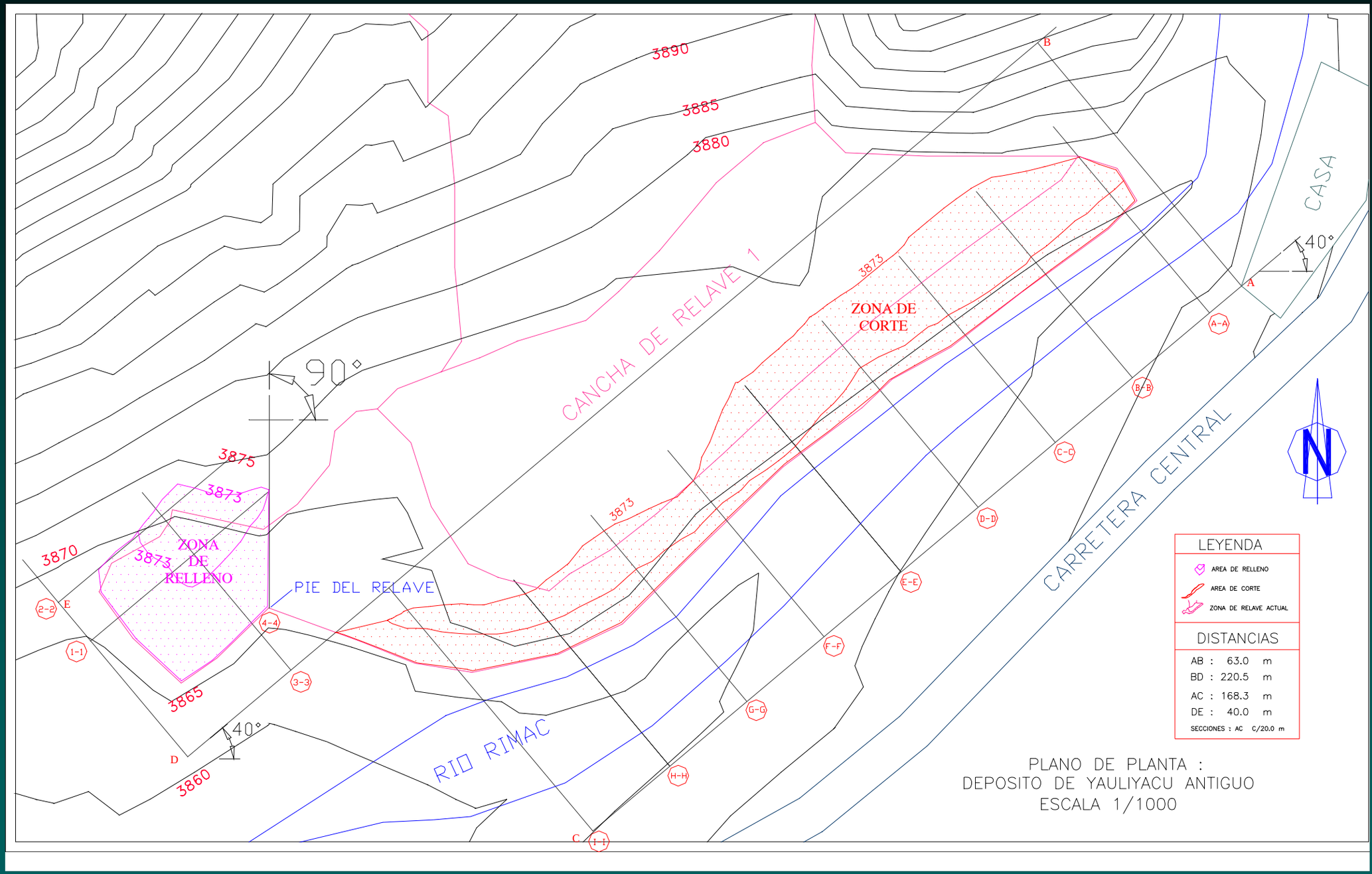
Resultados del Análisis de Estabilidad para la Remediación Depósito de Relaves de Antuquito

Depósito	Sección	Talud H:V	Factores de Seguridad	
			Estático	Seudo-estático
Antuquito	1-1	3:1	**1.63**	**1.17**
	2-2	3:1	**1.65**	**1.14**

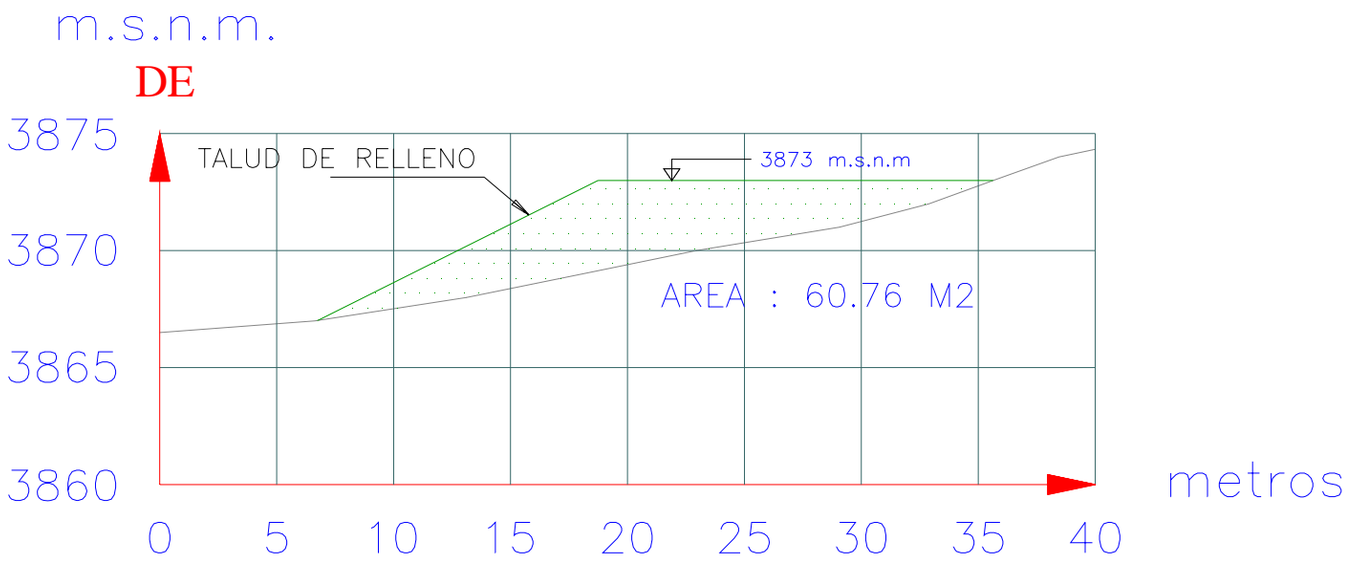
Conclusiones: adecuadas condiciones de estabilidad



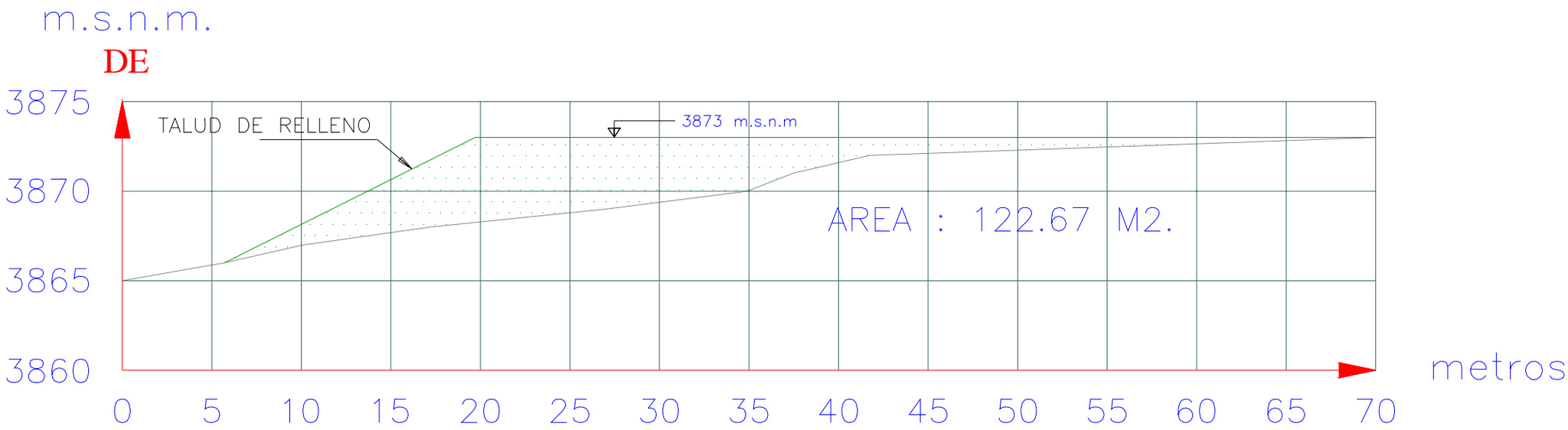
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL LABORATORIO GEOTECNICO – CISMID	DIBUJO : R.V.M.J FECHA : Agosto/98	REVISADO : Ing. Denys Parra M. Ing. Martín Rodríguez	APROBADO : Dr. Jorge Alva H.	CENTROMIN PERU S.A. GERENCIA DE ASUNTOS AMBIENTALES	PROYECTO : ABANDONO DE DEPOSITO DE RELAVES DE ANTUQUITO PLANO : PLANTA, OBRAS EXISTENTES Y OBRAS PROYECTADAS	ESCALA : 1 : 500	PLANO: P-01



PLANO DE PLANTA :
DEPOSITO DE YAULIYACU ANTIGUO
ESCALA 1/1000



SECCION 1–1



SECCION 2–2

COSTOS DE LAS OBRAS DE ABANDONO ANTUQUITO

DESCRIPCIÓN	COSTO US$	% de Incidencia Respecto al Costo Directo
Obras Preliminares	12,368	3.2
Corte y Traslado de Relaves	118,840	30.6
Cobertura Técnica Antuquito	64,810	16.7
Cobertura Técnica Yauliyacu Antiguo	29,938	7.7
Muro de Sostenimiento	86,565	22.3
Obras de Drenaje Quebrada 21	25,297	6.5
Canal de Coronación	24,157	6.2
Cunetas	26,009	6.7
Monitoreo	435	0.1
Total Costo Directo	**388,422**	--
Gastos Generales (10%)	38,842	--
Utilidades (10%)	38,842	--
Sub-Total	466,106	--
IGV (18%)	83,899	--
Costo Total	**550,005**	--

Presa de Relave Antuquito Después de la Remediación

Presa de Relave Antuquito Abril 2005

Centromin
PERU

CONCLUSIONES

1) El mayor problema es evaluar la seguridad sísmica de presas existentes.

2) El factor más común es la licuación de suelos.

3) Los ensayos SPT y CPT se utilizan para evaluar la licuación en presas de relave.

4) Se requieren correcciones por sobrecarga, inclinación del terreno y magnitud sísmica para evaluar la licuación.

5) El análisis post-licuación emplea equilibrio límite y deformación.

6) Los parámetros dinámicos de los materiales controlan las características de la respuesta sísmica.

7) El análisis de respuesta sísmica permite evaluar los esfuerzos cortantes dinámicos y las características de amplificación del depósito.

8) En un depósito inactivo, el análisis dinámico involucra la estabilidad seudo-estática y el cálculo de las deformaciones permanentes por sismo.

9) En un depósito operativo, se requiere evaluar el potencial de licuación, analizar la resistencia residual, realizar un análisis de estabilidad post-sismo y evaluar el potencial de deformación.

RECOMENDACIONES

1) Llevar a cabo estudios de respuesta sísmica en depósitos de relaves en operación o en proceso de abandono, para evaluar y garantizar su estabilidad.

2) Proyectar un adecuado sistema de drenaje, para disminuir la zona saturada y la posibilidad de licuación.

3) Controlar la compacidad y el contenido de finos de los relaves gruesos del dique del depósito, para garantizar un adecuado comportamiento.