

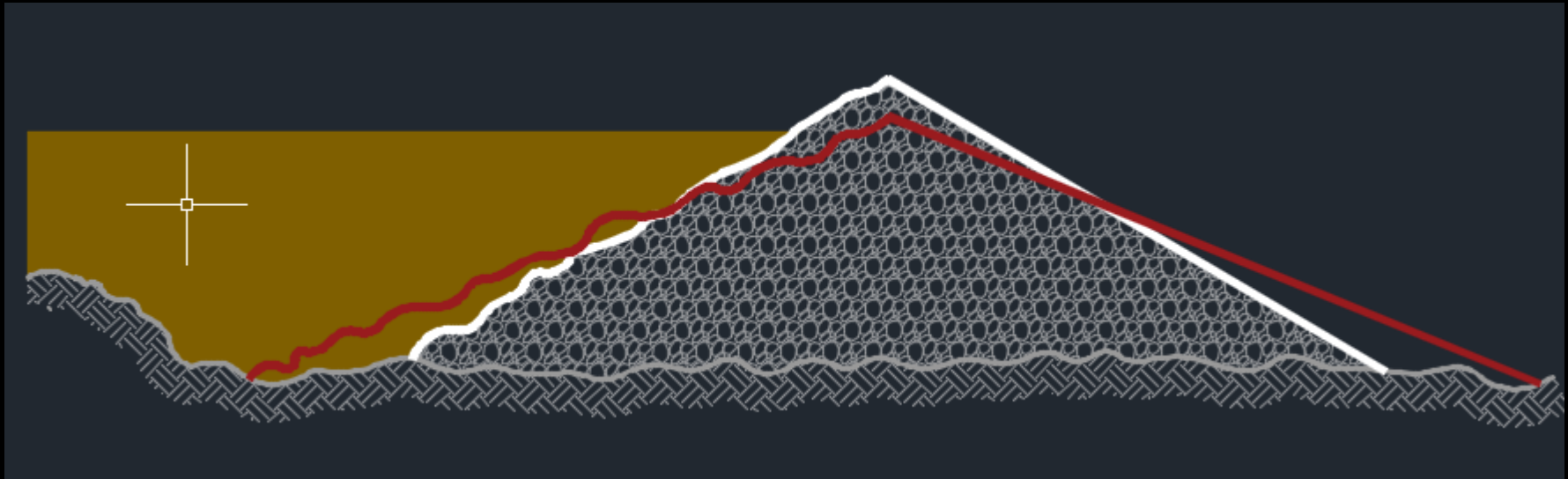


Selección de los Sismos de Diseño para el Análisis Dinámico de Presas de Relaves

Presentador: A.V. Kozlowski
Autores: A. V.Kozlowzki, P. Barbieri
SRK Consulting (Argentina)

El sismo máximo de diseño (MDE)

- El diseño de la revancha de una presa de relaves debe asegurar que los asentamientos residuales máximos en el coronamiento luego de un evento sísmico no superen el nivel máximo del reservorio, y estará condicionada por la **demanda sísmica**.



El sismo máximo de diseño (MDE)

- La magnitud del **sismo máximo de diseño (MDE)** dependerá de la **tasa anual de excedencia** que se obtiene a partir del análisis probabilístico de peligro sísmico del sitio de la presa
- La **demanda sísmica** en términos de asentamientos máximos residuales esperables en el coronamiento, se obtiene mediante un modelo FEM de **análisis dinámico de la presa** para una serie de acelerogramas escalados al nivel de servicios del MDE

El sismo máximo de diseño (MDE)

- El Sismo Máximo de Diseño (MDE) estará asociado en general a un evento sísmico extremo en donde se acepta que la presa pueda llegar sufrir daños severos con consecuencias económicas importantes, sin llegar a producirse una falla catastrófica como podría ser el vertido de relaves sin control.
- El MDE definido en estos términos es equivalente al SEE (Safety Evaluation Earthquake) según ICOLD o al EDGM (Earthquake Design Ground Motion) según el Canadian Dam Association CDA

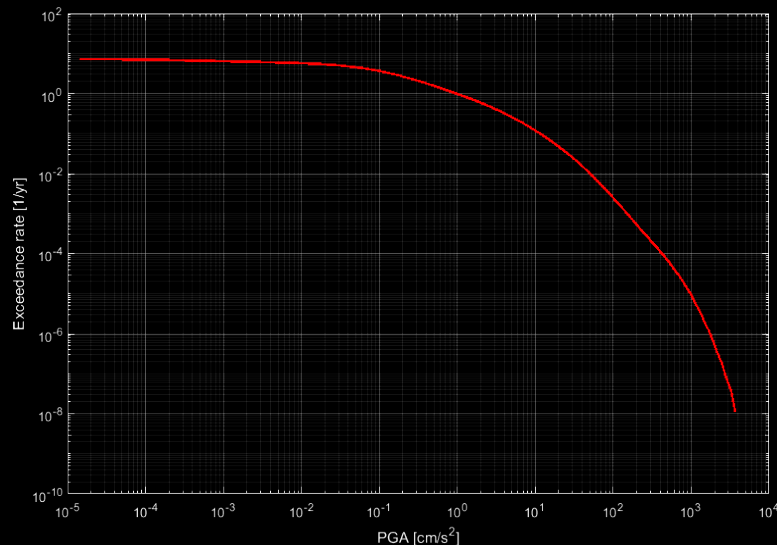
El sismo máximo de diseño (MDE)

- En presas de relaves, la probabilidad anual de excedencia (AEP) y el sismo máximo de diseño (MDE) dependerán en general de las etapas de operación o cierre para las que se analiza la presa

Riesgo Clase	AEP – Presas de Relaves Operación y Cierre Activo	AEP – Presas de Relaves Cierre Pasivo
Bajo	1/100	1/1.000
Significativo	$1/100 < \text{AEP} < 1/1000$	1/2500
Alto	1/2500	$1/2500 < \text{AEP} < 1/10000$ or MCE
Muy Alto	$1/2500 < \text{AEP} < 1/10000$ or MCE	1/10.000 or MCE
Extremo	1/10000 or MCE	1/10.000 or MCE

El sismo máximo de diseño (MDE)

En presas de bajo riesgo, la AEP suele definirse a partir de un único modelo de amenaza obtenido con los valores medios (o medianas) de los diferentes modelos de recurrencia, zonificación y atenuación sísmica. El MDE obtenido de este modo, será un valor medio, con una probabilidad cercana al 50% de ser superado



TR	P[$I > i^*$, $T_e = 1$] AEP	P[$I > i^*$, $T_e = 50$]	PGA (MEAN)
500	0.2 %	9.52 %	110
1000	0.1 %	4.88 %	150
2500	0.04 %	1.98 %	255
5000	0.02 %	1.00 %	309
10000	0.01 %	0.50 %	422

El sismo máximo de diseño (MDE)

La probabilidad anual de excedencia que determina el MDE se obtiene a partir de análisis del peligro sísmico del sitio que comprende los siguientes modelos:

- Un modelo sismotectónico regional, que define la ubicación de las fuentes, el tipo de mecanismo sismogénico y la profundidad de los hipocentros
- Un modelo de recurrencia, que defina la tasa de generación de eventos de magnitud M y la magnitud máxima y mínima esperable para cada fuente
- Un modelo empírico de predicción de intensidades (GMPE) que defina el nivel de intensidad esperable en el sitio del proyecto, para un evento de magnitud m^* ocurrido en una fuente a una distancia r^*

El sismo máximo de diseño (MDE)

- Los modelos de zonificación sísmica suelen considerar diferentes escenarios en la definición de la profundidad de los hipocentros de cada fuente, y en el tipo de mecanismos de generación de cada fuente (sismos de subducción intra-placa o interplaca, sismos corticales, etc.)
- Los modelos de recurrencia sísmica suelen considerar diferentes escenarios en el valor del sismo máximo esperable en cada fuente y en los parámetros de generación anual de eventos

El sismo máximo de diseño (MDE)

- La elección de un modelo único de atenuación (GMPE) para una fuente dada, puede introducir un importante error en el cálculo de la amenaza
- Para la mayoría de las regiones sísmicamente activas en el mundo no existen modelos GMPE específicos para cada sitio.
- Incluso en las áreas fuertemente estudiadas, como la costa de California, no es posible identificar un modelo único que describa correctamente la intensidad sísmica esperable en el sitio

El sismo máximo de diseño (MDE)

GMPE		η_{PGA}				
SUBDUC	CRUSTAL	1000	2000	3000	5000	10000
S 93	S 93	0.08	0.10	0.11	0.14	0.15
I 93	I 93	0.13	0.15	0.16	0.19	0.21
DA 95	DA 95	0.18	0.20	0.22	0.25	0.29
S 97	S 97	0.20	0.23	0.25	0.28	0.32
YO97	SA97	0.23	0.27	0.31	0.33	0.38
YO 97	CA 81	0.24	0.29	0.31	0.35	0.41
CV 80	M74	0.32	0.37	0.39	0.44	0.50
JB 93	JB 93	0.46	0.53	0.57	0.66	0.76

GMPE	β_{PGA}	cov
Sadigh 97	1.52	+78%
Youngs 97	1.45	+76%
Idriss 08	1.28	+72%
McVerry 06	0.87	+58%
Atkinson & Boore 08	0.8	+55%
Campbell & Bozorgnia 08	0.72	+51%
Abrahamson & Silva	0.71	+51%
Chiou Youngs 08	0.65	+48%
Atkinson & Boore 03	0.33	+28%
Zhao 97	0.23	+20%

$$\eta_{PGA}(m, r) = \exp[\mu_{\ln(PGA)}(m, r)]$$

$$\beta_{PGA}(m, r) = \sigma_{\ln(PGA)}(m, r)$$

$$PGA = \eta_{PGA}(m, r) * \beta_{PGA}(m, r)$$

$$\frac{\beta_{PGA}^{max}}{\beta_{PGA}^{min}} \approx 6.7 \quad \frac{PGA_{max}}{PGA_{min}} \approx 5.1$$

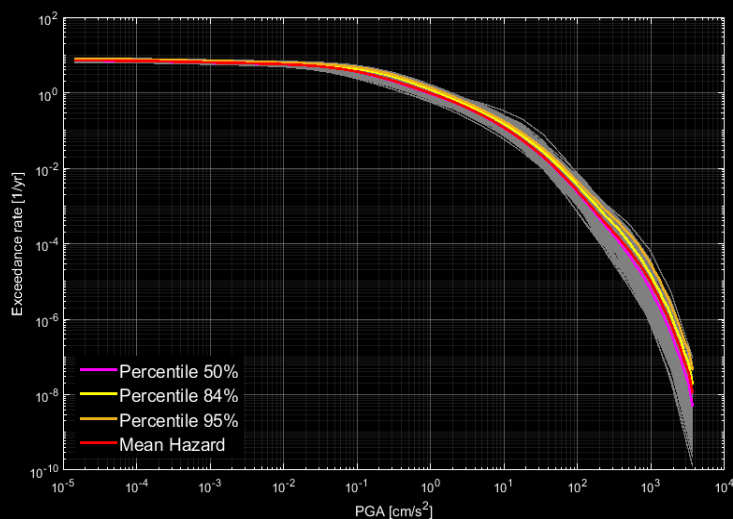
El sismo máximo de diseño (MDE)

Para incorporar esta incertidumbre, se recomienda el empleo de árboles lógicos con modelos GMPE globales para cada mecanismo de generación (Stewart 2012)

- Fuentes corticales
 - Akkar & Boomer (2010)
 - Chiou & Youngs (2008)
 - Zhao (2006)
- Fuentes de Subducción
 - Abrahamson BC-Hydro (2012)
 - Atkinson & Boore (2008)
 - Zhao (2006)
- Fuentes continentales (estables)
 - Pezeshk (2011)
 - Atkinson & Boore ENA GMPE (2006)
 - Silva ENA GEMPE (2002)
 - Toro (2002)

El sismo máximo de diseño (MDE)

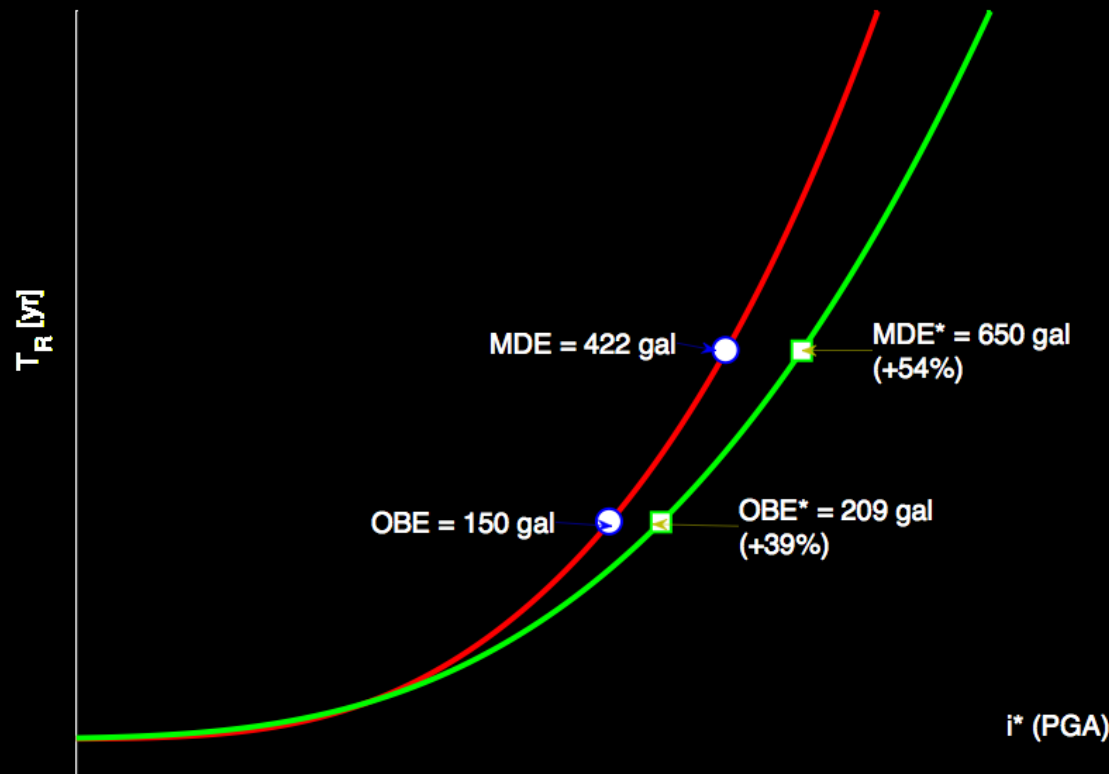
En presas de muy alto riesgo, el MDE debería definirse como un valor característico para una cierta probabilidad de excedencia, considerando mediante un árbol la incertidumbre epistémica aportada por los diferentes escenarios de zonificación, recurrencia y atenuación



TR	P[$I > i^*$, $T_e=1$] AEP	P[$I > i^*$, $T_e=50$]	PGA (MEAN)	PGA* (50%)	PGA* (84%)	PGA* (95%)
500	0.2 %	9.52 %	110	106	131	148
1000	0.1 %	4.88 %	150	143	182	209
2500	0.04 %	1.98 %	255	212	280	345
5000	0.02 %	1.00 %	309	287	391	480
10000	0.01 %	0.50 %	422	382	517	650

El sismo máximo de diseño (MDE)

La incorporación de la incertidumbre epistémica en el AEP equivale a considerar una mayor demanda sísmica para la presa de relaves



Modelos FEM para Análisis Dinámico

El análisis dinámico no lineal para la determinación de desplazamientos residuales, requiere el empleo de métodos numéricos, como técnica de solución de problemas complejos

Geometría compleja: capas, bermas, filtros, forma del valle

Material complejo: fluencia (creep), amortiguamiento

Secuencia constructiva compleja: recrecimientos, compactación, drenaje

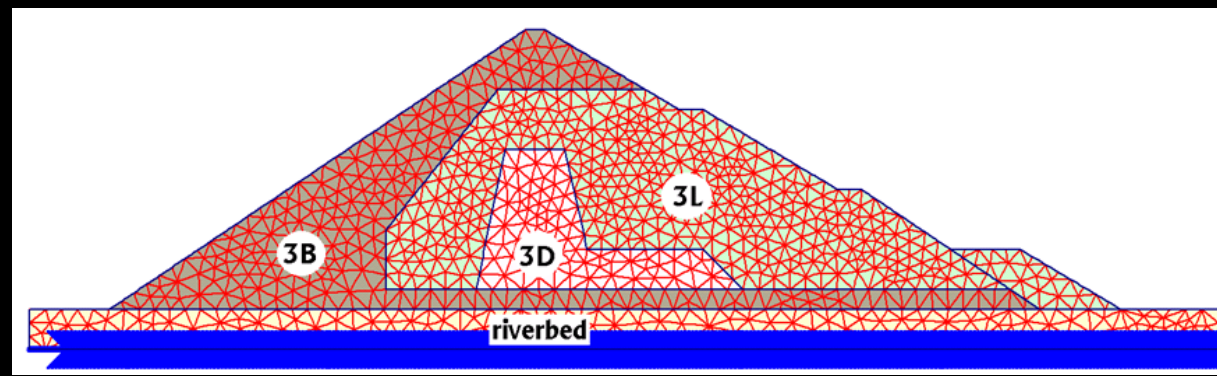
Acción compleja: señal sísmica con componentes x, y, z. Señal incoherente (presas largas). Efectos de amplificación local del sitio

Modelos FEM para Análisis Dinámico

Los modelos numéricos modernos para presas tienen que tener los siguientes elementos básicos

- **Zonificación de materiales**, en función de las características mecánicas de los diferentes materiales empleados durante las etapas del proceso constructivo.

En esta malla, cada zona tiene **un único juego** de parámetros materiales

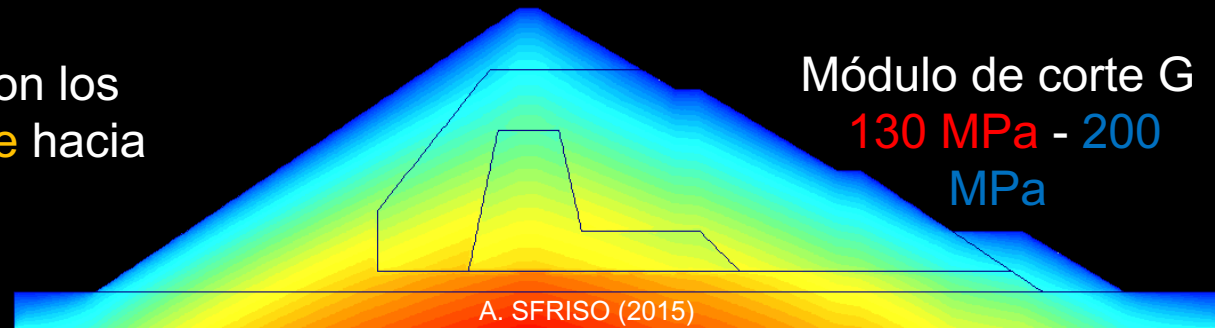


Modelos FEM para Análisis Dinámico

Los modelos numéricos modernos para presas tienen que tener los siguientes elementos básicos

- Zonificación de materiales
- **Rigidez elástica** dependiente de la presión y la densidad para cada uno de los materiales que forman la presa

A pesar de que los parámetros son los mismos, el **módulo de corte crece** hacia el interior de la presa

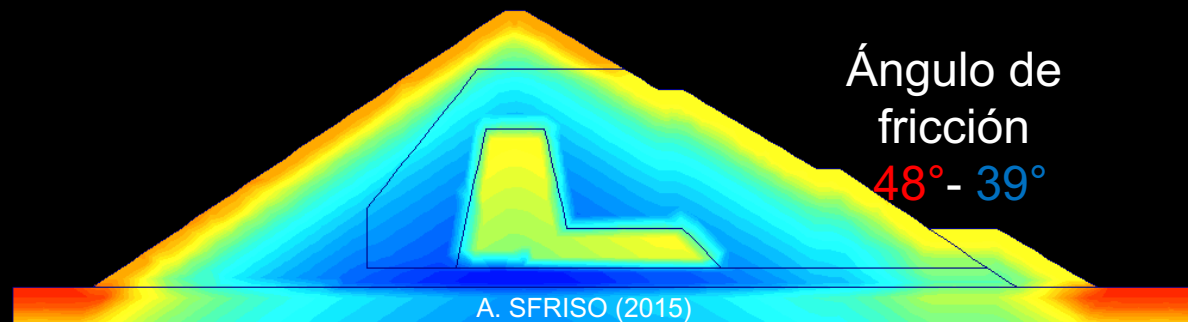


Modelos FEM para Análisis Dinámico

Los modelos numéricos modernos para presas tienen que tener los siguientes elementos básicos

- Zonificación de materiales
- Rigidez elástica
- **Ángulo de fricción interna** dependiente de la presión y la densidad para cada uno de los materiales que forman la presa

A pesar de que los parámetros son los mismos, **el ángulo de fricción interna disminuye** hacia el interior de la presa

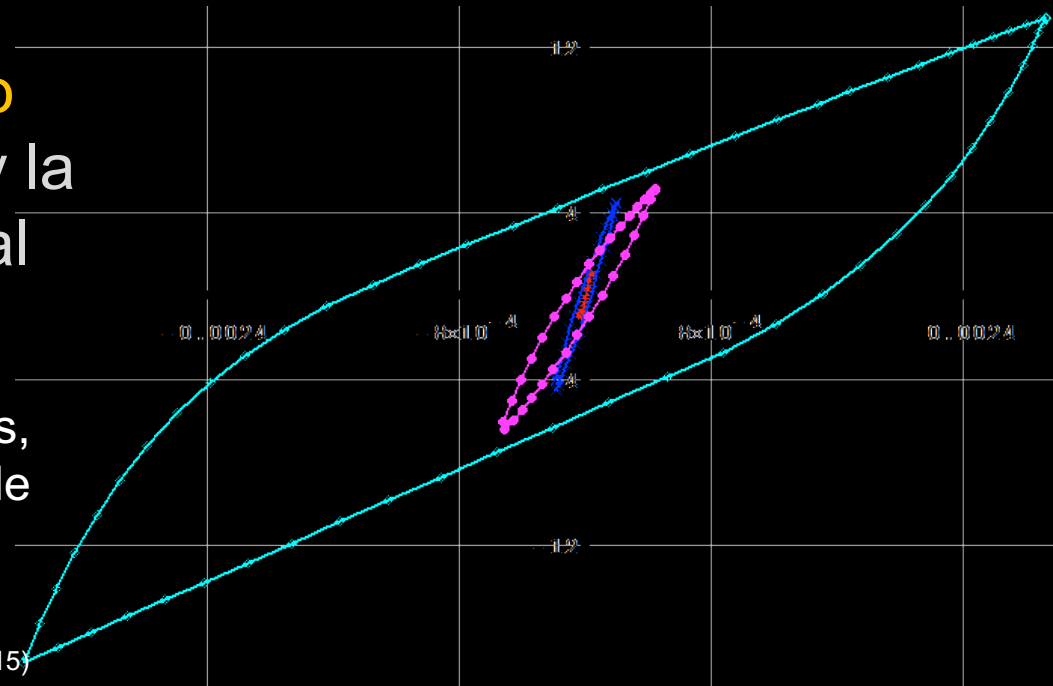


Modelos FEM para Análisis Dinámico

Los modelos numéricos modernos para presas tienen que tener los siguientes elementos básicos

- Zonificación de materiales
- Rigidez elástica
- Ángulo de fricción interna
- **Amortiguamiento histerético** dependiente de la presión y la densidad para cada material

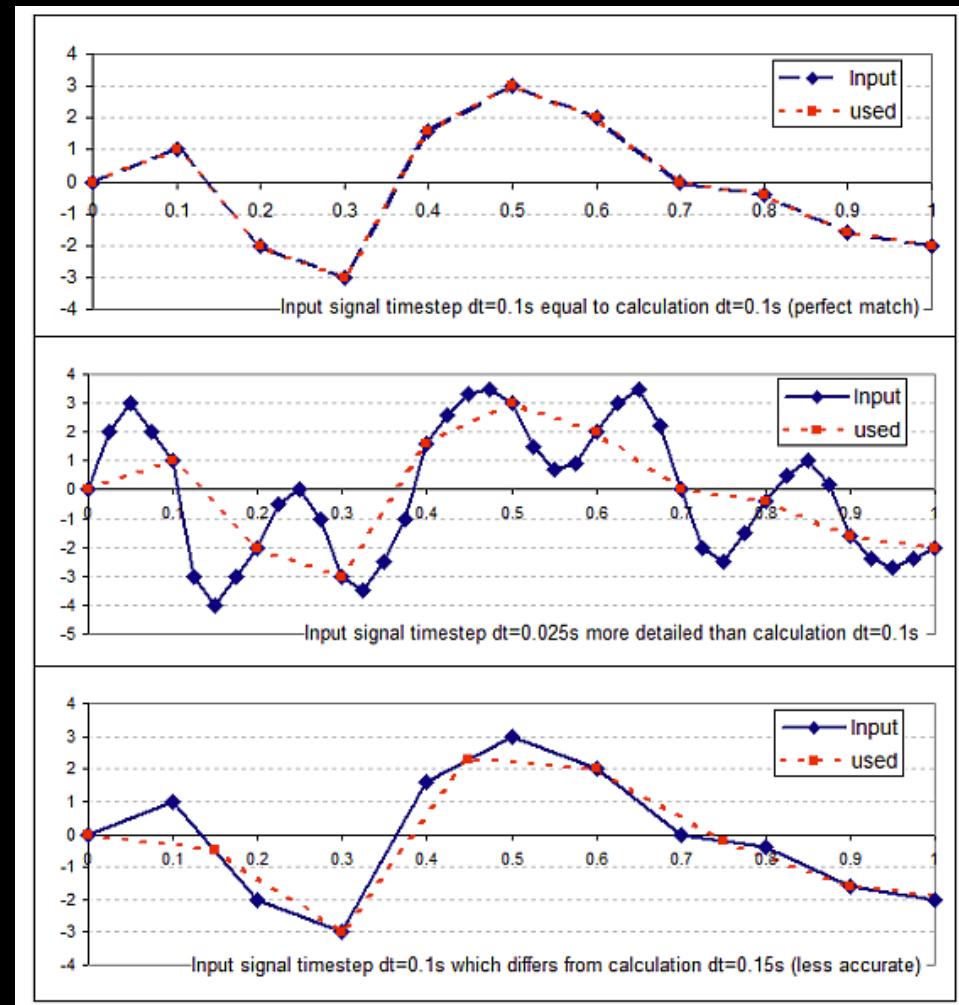
A pesar de que los parámetros son los mismos, **el amortiguamiento aumenta** con la amplitud de la carga, la presión y la densidad



Modelos FEM para Análisis Dinámico

Paso de cálculo

- Los registros sísmicos son señales digitales que poseen entre 40 y 200 aceleraciones por segundo y pueden durar hasta 120 segundos.
- Cada muestra requiere la resolución de un problema no lineal completo y el cálculo demanda mucho tiempo. La elección de un paso de cálculo **menor** a la frecuencia de muestreo debe evitar fenómenos de “aliasing”

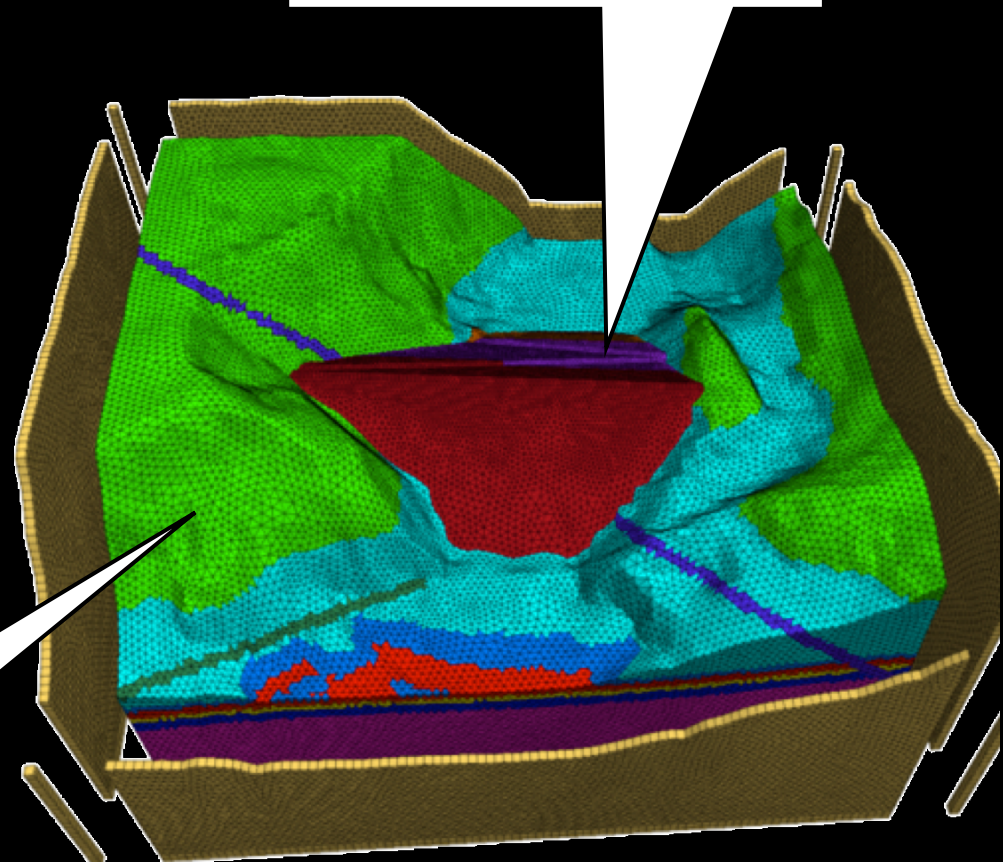


Modelos FEM para Análisis Dinámico

- Paso de cálculo
- **Tamaño máximo del elemento**
La Señal no debe cambiar su contenido de frecuencias y el tamaño máximo de los elementos debe ser proporcional a la velocidad de propagación en cada material

Tamaño de elementos que permite propagar ondas hasta la máxima frecuencia significativa

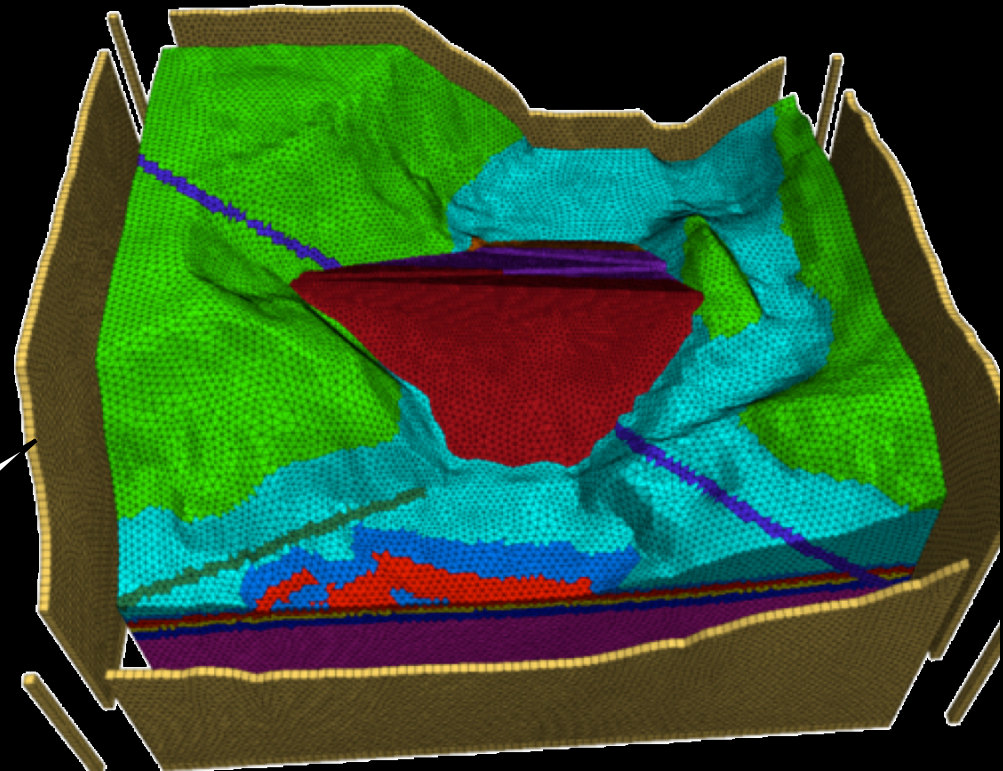
Elementos más chicos por menor velocidad de propagación en la



Modelos FEM para Análisis Dinámico

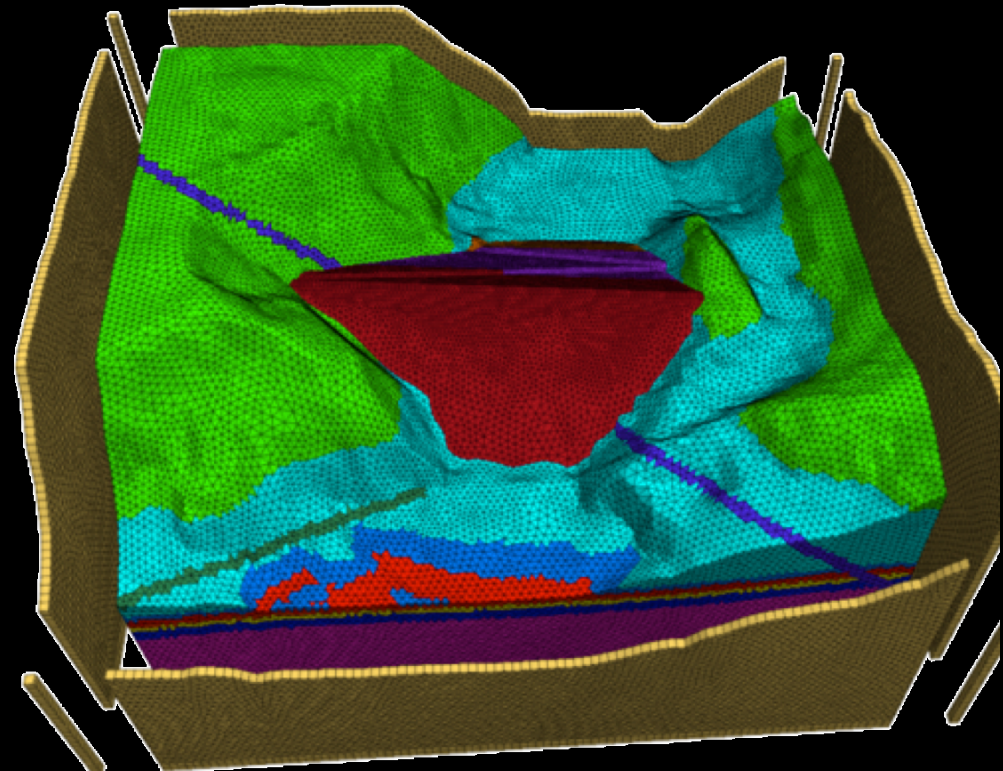
- Paso de cálculo
- Tamaño máximo del elemento
- **Bordes absorbentes:**
La señal no debe rebotar en los bordes. Los bordes pertenecen al modelo, no a la realidad; no existen bordes verticales en una presa real

La onda mecánica llega a los bordes absorbentes y no se debe reflejar al interior de la presa



Modelos FEM para Análisis Dinámico

- Paso de cálculo
- Tamaño máximo del elemento
- Bordes absorbentes
- **Señal a nivel de Fundación**
La señal sísmica se define sobre la base del modelo, que no siempre es de suelo duro. Los registros deben ser deconvolucionados previamente a ese nivel para no generar una amplificación numérica

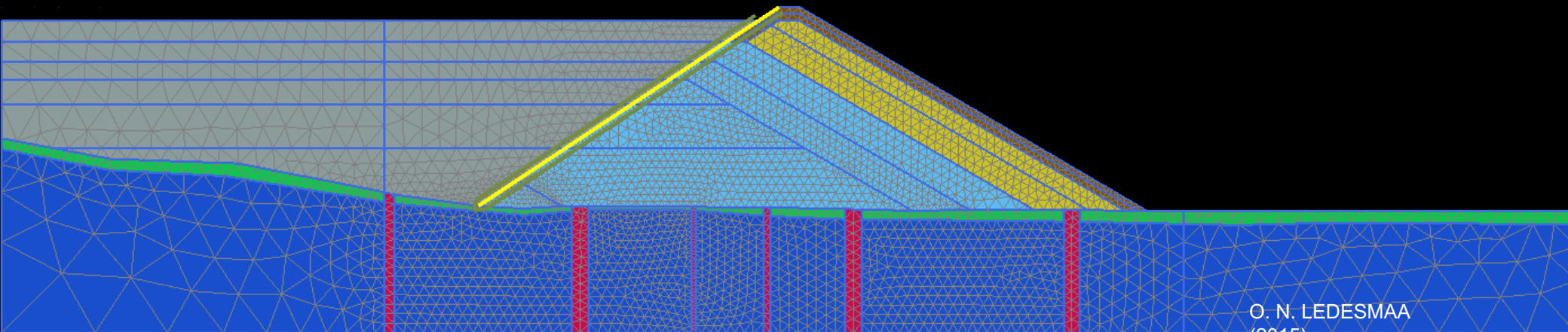


Análisis de la Demanda Sísmica

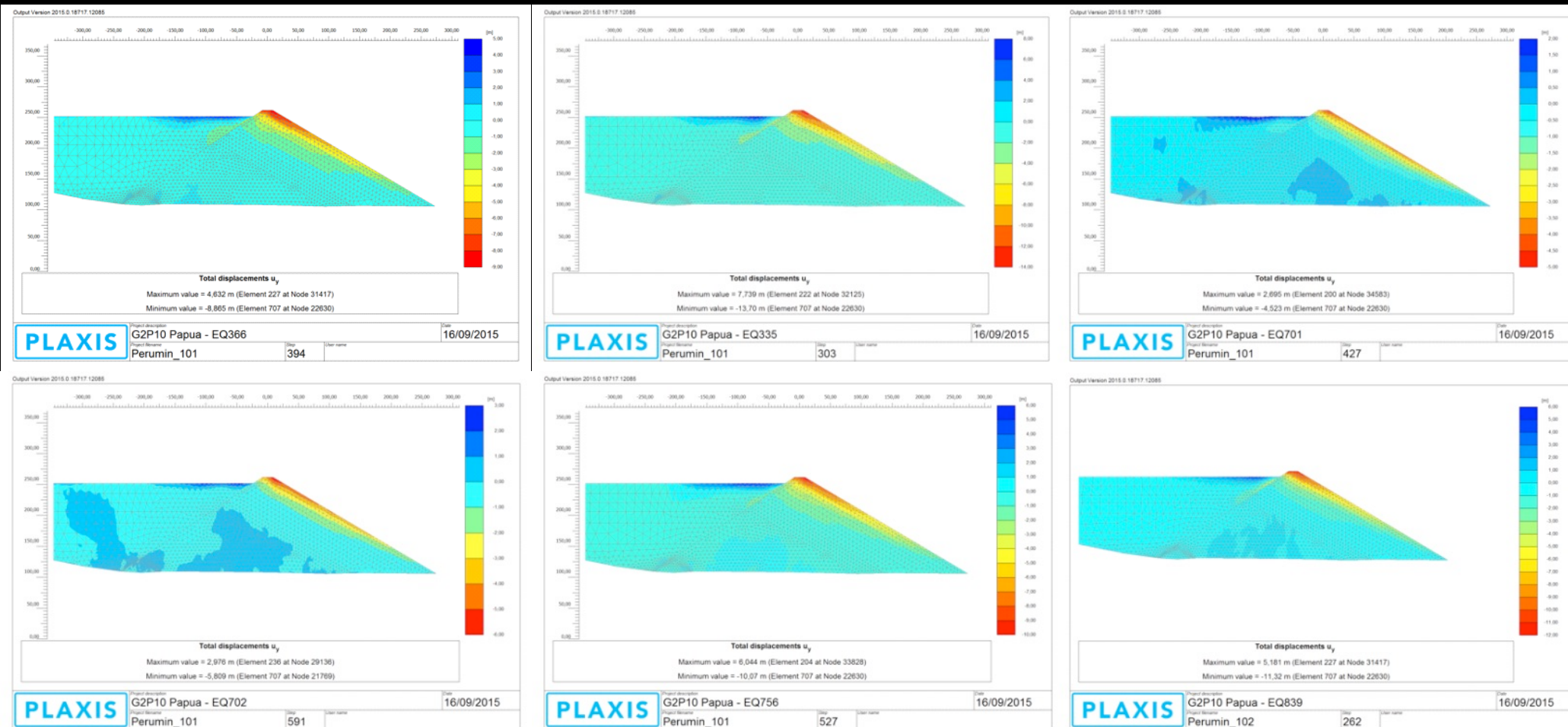
- Para determinar la demanda sísmica en término de asentamientos permanentes en el coronamiento de una presa de relaves, se presenta un modelo numérico de elementos finitos dinámico no-lineal 2D en PLAXIS para una presa de enrocado de 156 m de altura, con taludes 1:1.5 y 1:1.7 aguas arriba y aguas abajo respectivamente.
- En el modelo, se analizaron un total de 18 registros sísmicos previamente seleccionados sobre una base de 1200 registros y escalados a un sismo de diseño MDE de 0.70g

Análisis de la Demanda Sísmica

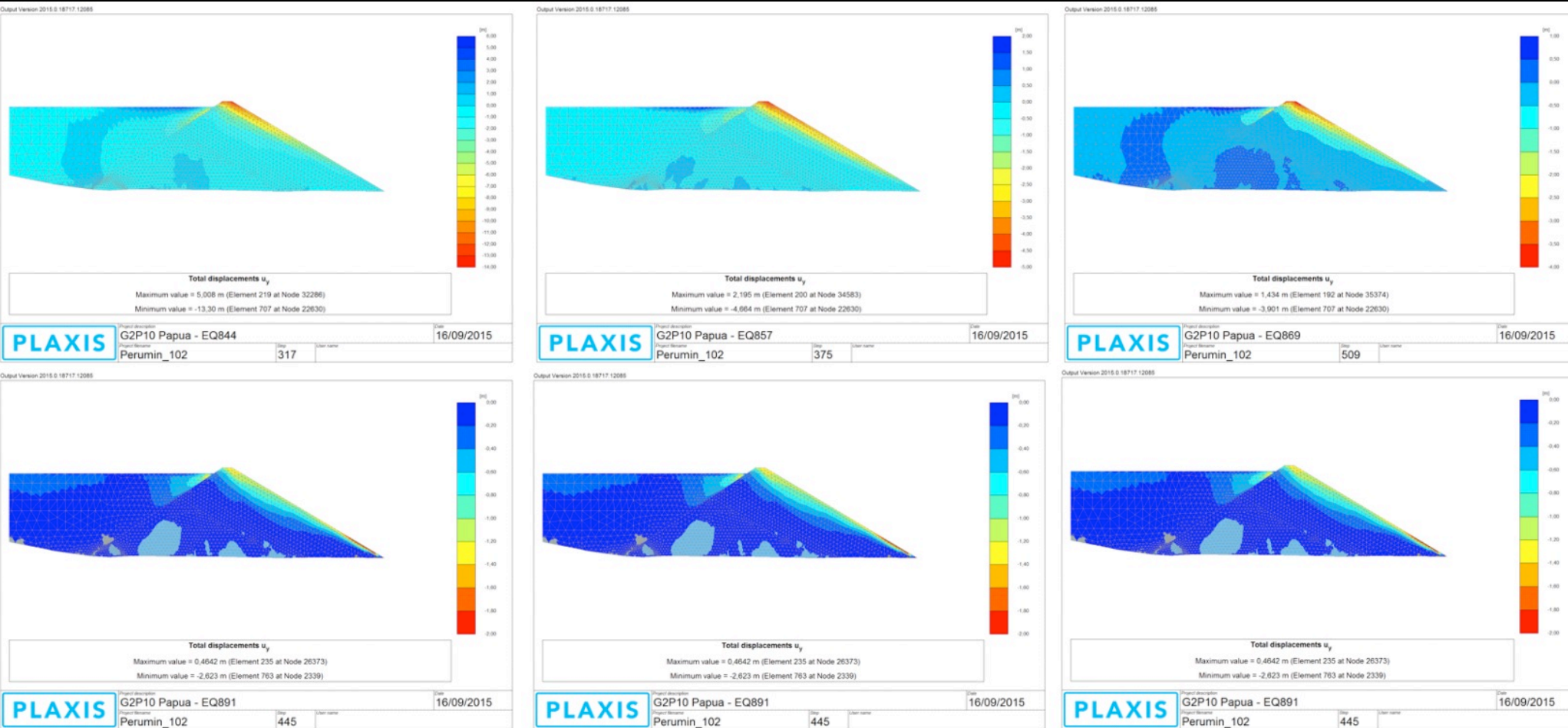
- El modelo incorporó las características del estado del arte como la zonificación de materiales, la rigidez elástica y el ángulo de fricción dependiente de la presión, y ecuaciones constitutivas con amortiguamiento histerético
- El modelo 2D empleó una malla de **50,000 nodos** y un tamaño promedio de elemento de 7.0 m y demandó entre **4 y 12 horas de cálculo** por cada registro sísmico.



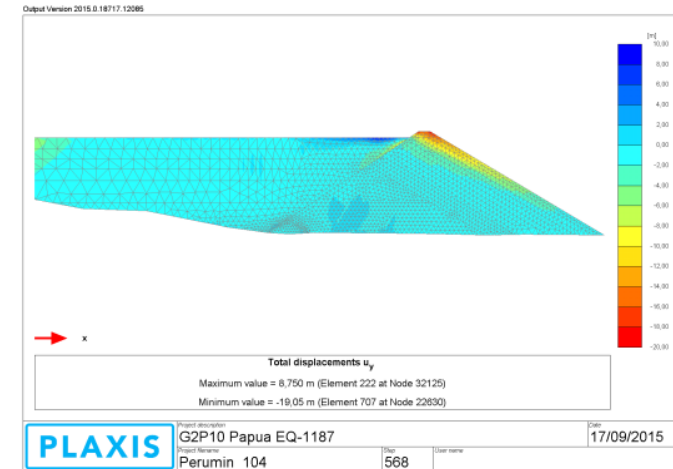
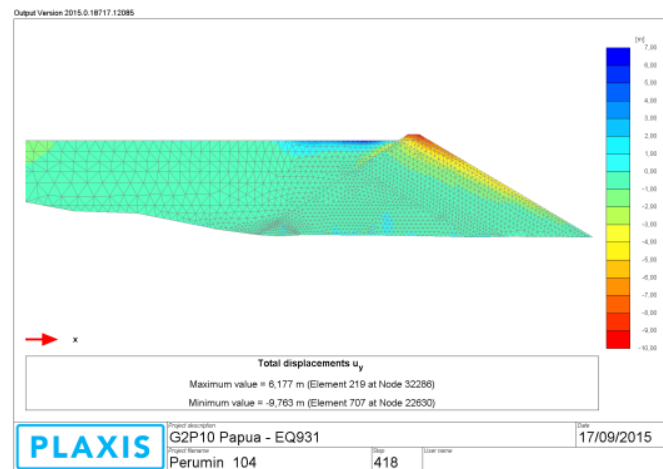
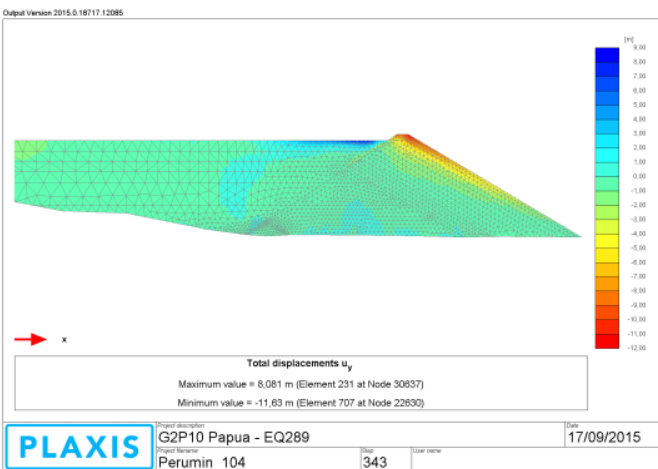
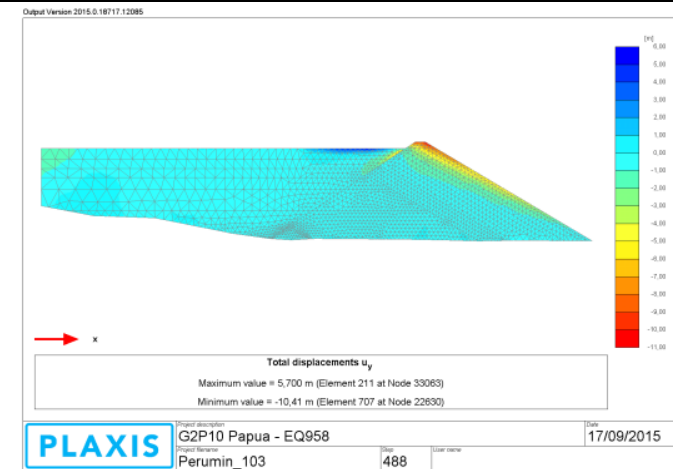
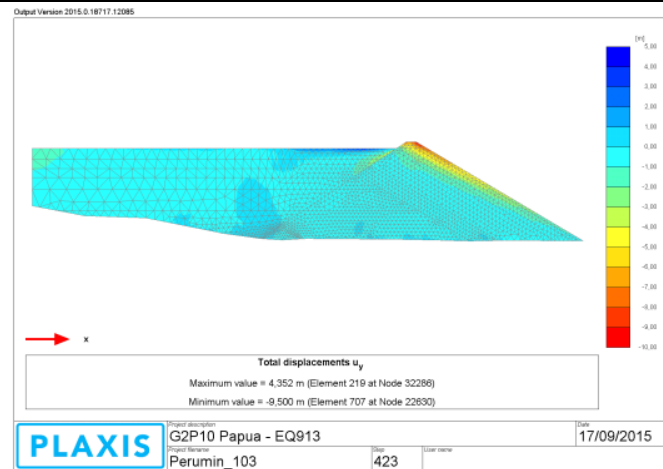
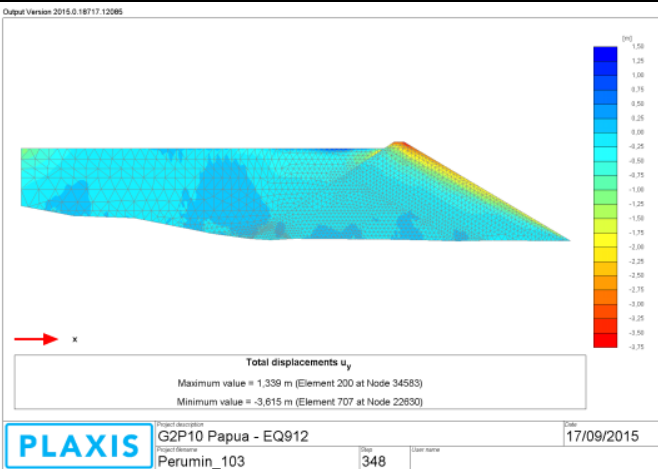
Análisis de la Demanda Sísmica



Análisis de la Demanda Sísmica



Análisis de la Demanda Sísmica



Análisis de la Demanda Sísmica

- El modelo FEM 2D, reportó asentamientos permanentes en el coronamiento para 18 registros sísmicos escalados a un evento máximo de diseño (MDE) de 2.500 años de Período de Retorno
- El modelo reportó asentamientos permanentes para la presa comprendidos entre **3.0 m y 17.0 m** con un valor medio de **7.40 m** y un **COV del 54%**
- Si quisiera diseñar a mi presa para un nivel de asentamientos con un 16% de probabilidad de ser superados, debo diseñar una revancha para un nivel máximo de desplazamientos de **$D=7.40*(1+0.54) = 11.40 \text{ m}$**

RCSEQ	FEM D [m]
912	3.00
701	3.25
1075	3.25
702	3.50
869	3.50
857	3.90
904	4.25
1787	5.88
913	7.25
366	7.50
756	8.00
931	8.50
958	8.75
839	10.50
1155	11.00
844	11.75
335	12.00
1187	17.00
	7.38

Análisis de la Demanda Sísmica

¿Cuál es el asentamiento que debo adoptar para el diseño de mi revancha ?

- Para un set arbitrario de registros sísmicos escalado a la intensidad de diseño, el valor medio (7.40 m) no puede considerarse como el valor más probable, ya que el estimador empleado es un estimador sesgado de la mediana.
- Tampoco los valores característicos del percentil 84% (11.40 m) representan a los valores máximos probables, ya que el set de registros seleccionado no necesariamente representa la variabilidad todos los sismos esperables en el sitio.

RCSEQ	FEM D [m]
912	3.00
701	3.25
1075	3.25
702	3.50
869	3.50
857	3.90
904	4.25
1787	5.88
913	7.25
366	7.50
756	8.00
931	8.50
958	8.75
839	10.50
1155	11.00
844	11.75
335	12.00
1187	17.00
	7.38

Análisis de la Demanda Sísmica

- La variabilidad de los asentamientos permanentes esperables en el coronamiento de una presa de relaves está asociada a la variabilidad en el contenido de frecuencias, duración del registro, cantidad de pulsos superiores a la aceleración crítica de fluencia, y otros parámetros de intensidad de un registro sísmico que actúe sobre la base de la presa
- Luego la elección arbitraria de un conjunto de registros sísmicos introduce un **sesgo** (error) en la determinación de la “**verdadera**” demanda sísmica

Análisis de la Demanda Sísmica

- El análisis dinámico de una presa de relaves debe efectuarse sobre un conjunto de registros sísmicos que **preserve a variabilidad de la incertidumbre aleatoria de la demanda**, para todos los sismos posibles

Análisis de la Demanda Sísmica

- El análisis dinámico de una presa de relaves debe efectuarse sobre un conjunto de registros sísmicos que preserve a variabilidad de la incertidumbre aleatoria de la demanda, para todos los sismos posibles

¿Cómo puedo estimar la variabilidad de la demanda sísmica para los sismos posibles esperables en el sitio de emplazamiento?

Estimación de la Demanda Sísmica

- La estimación de la demanda sísmica puede efectuarse mediante un Análisis de Newmark a través de un modelo numérico simplificado (proxy) basado en la respuesta dinámica del bloque deslizando de Newmark sometido a aceleraciones en subbase (cuña de falla).
- La respuesta dinámica (amplificación) en términos de aceleraciones transversales y longitudinales, puede estimarse a partir de un modelo analítico de una viga de corte 2D.
- Los asentamientos residuales al final del evento sísmico pueden estimarse mediante un modelo numérico (no-lineal) basado en el bloque de Newmark

Estimación de la Demanda Sísmica

Para un registro sísmico arbitrario escalado a un nivel de servicio MDE, la demanda sísmica de la presa puede estimarse mediante el siguiente procedimiento

1. Estimación de la respuesta dinámica de la presa
2. Cálculo de las aceleraciones instantáneas sobre un plano de falla arbitrario
3. Cálculo de las aceleraciones instantáneas promedio de la cuña en potencial deslizamiento
4. Cálculo de la aceleración crítica relativa (k_y) de la cuña
5. Cálculo de los desplazamientos de Newmark de la cuña

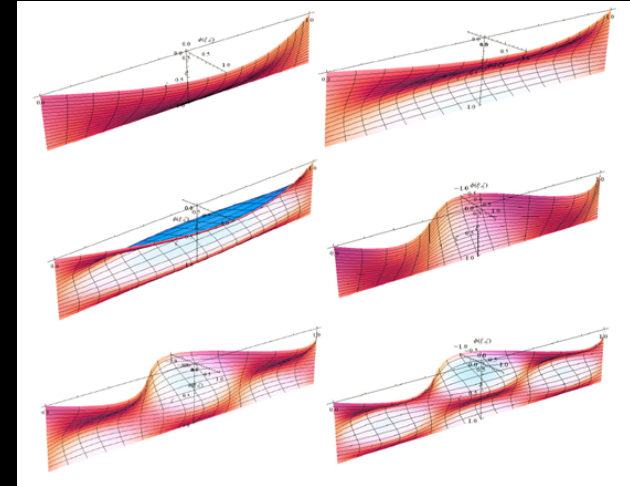
Estimación de la Demanda Sísmica

Estimación de la respuesta dinámica de una viga de sección variable truncada en su base:

$$\ddot{V}^a(\omega) = \Lambda(x, z, \omega) \cdot \ddot{V}_g(\omega)$$

$$\ddot{W}^a(\omega) = \tilde{\Lambda}(x, z, \omega) \cdot \ddot{W}_g(\omega)$$

Factores de amplificación espectral



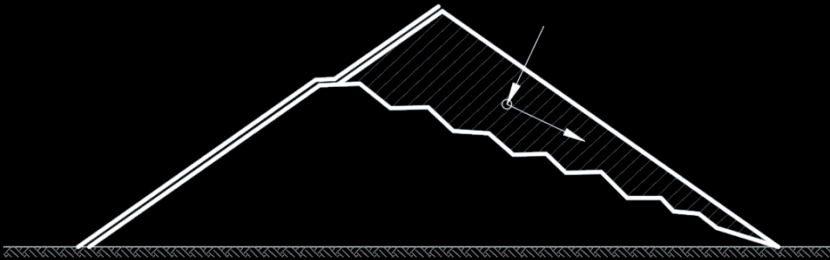
$$\Lambda(x, z, \omega) = 1 + \frac{8\omega^2}{\pi} \sum_{j=1,2,\dots}^{\infty} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{J_0(\beta_j z / H) \sin(kx / \pi L_o)}{k \beta_j J_1(\beta_j) \left[(\omega_{j,k})^2 + 2\xi_{j,k} \omega_{j,k} i\omega + (i\omega)^2 \right]}$$

$$\tilde{\Lambda}(x, z, \omega) = 1 + \frac{8\omega^2}{\pi} \sum_{j=1,2,\dots}^{\infty} \sum_{k=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{J_0(\beta_j z / H) \sin(kx / \pi L_o)}{k \beta_j J_1(\beta_j) \left[(\tilde{\omega}_{j,k})^2 + 2\tilde{\xi}_{j,k} \tilde{\omega}_{j,k} i\omega + (i\omega)^2 \right]}$$

Estimación de la Demanda Sísmica

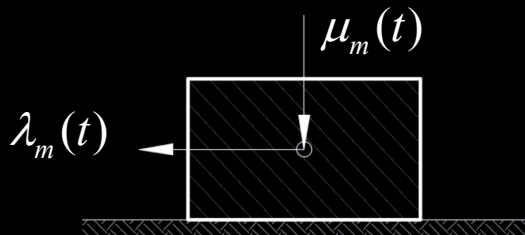
Cálculo del factor del coeficiente sísmico $\lambda_y(t)$ del bloque equivalente

Cuñas de aguas abajo (downstream)



$$FS(t) = \frac{\tan \phi_m (\cos \beta_o - \mu_m(t))}{\sin \beta_o + \lambda_m(t)}$$

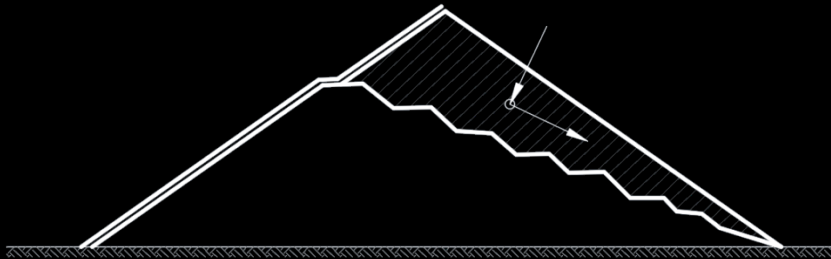
$$\lambda_y^o(t) = \tan \phi_m (\cos \beta_o - \mu_m(t)) - \sin \beta_o$$



Estimación de la Demanda Sísmica

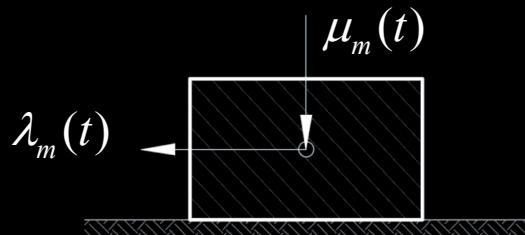
Cálculo del factor del coeficiente sísmico k_y del bloque equivalente

Cuñas de aguas abajo (downstream)

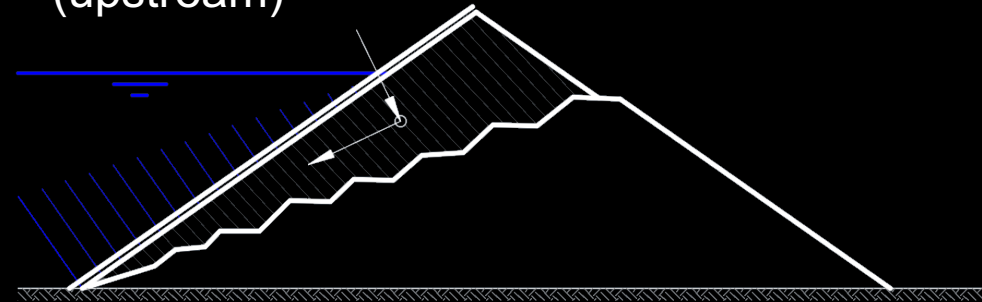


$$FS(t) = \frac{\tan \phi_m (\cos \beta_o - \mu_m(t))}{\sin \beta_o + \lambda_m(t)}$$

$$\lambda_y^o(t) = \tan \phi_m (\cos \beta_o - \mu_m(t)) - \sin \beta_o$$



Cuñas de aguas arriba (upstream)



$$FS(t) = \frac{\tan \phi_m (\cos \beta - \mu_m(t) + f_w \cos(\beta_o - \beta))}{\sin \beta_o + \lambda_m(t) - f_w \sin(\beta_o - \beta)}$$

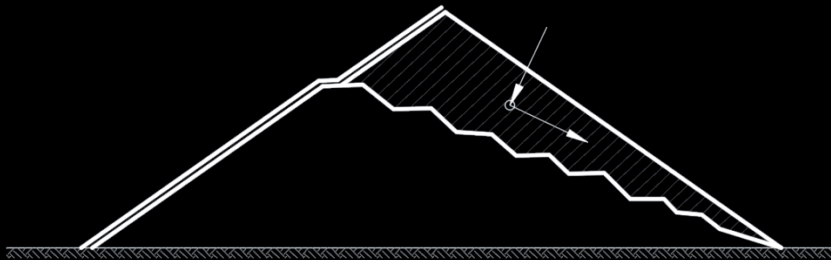
$$\lambda_y^w = \lambda_y^o + f_w \frac{\sin(\phi_m + \beta_o - \beta)}{\cos \phi_m}$$

$$f_w = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{H_w}{H_o} \right)^2 \frac{\sin(\beta_o + \beta) \sec(\beta_o)}{\sin(\beta_o - \beta)}$$

Estimación de la Demanda Sísmica

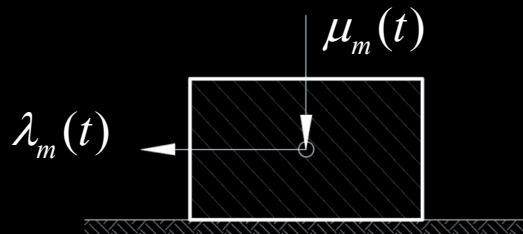
Cálculo del factor del coeficiente sísmico k_y del bloque equivalente

Cuñas de aguas abajo (downstream)

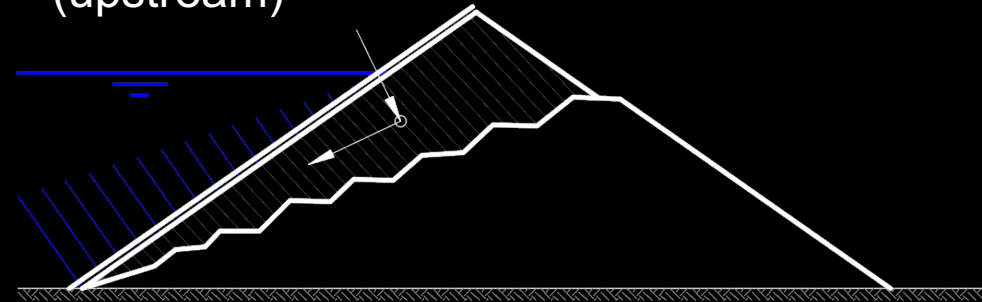


$$FS(t) = \frac{\tan \phi_m (\cos \beta_o - \mu_m(t))}{\sin \beta_o + \lambda_m(t)}$$

$$\lambda_y^o(t) = \tan \phi_m (\cos \beta_o - \mu_m(t)) - \sin \beta_o$$



Cuñas de aguas arriba (upstream)



$$FS(t) = \frac{\tan \phi_m (\cos \beta - \mu_m(t) + f_w \cos(\beta_o - \beta))}{\sin \beta_o + \lambda_m(t) - f_w \sin(\beta_o - \beta)}$$

$$\lambda_y^w(t) = \lambda_y^o(t) + f_w \frac{\sin(\phi_m + \beta_o - \beta)}{\cos \phi_m}$$

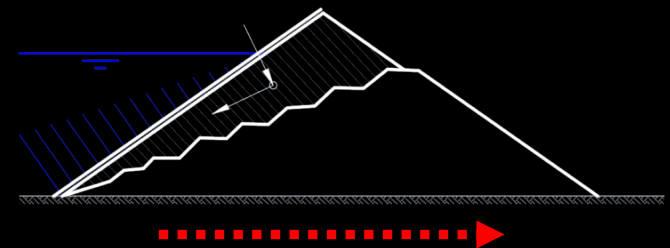
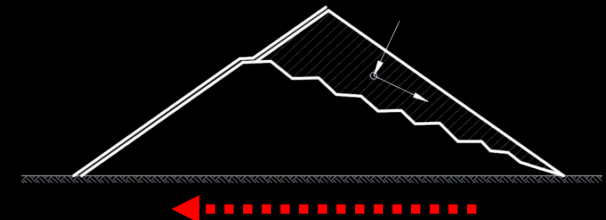
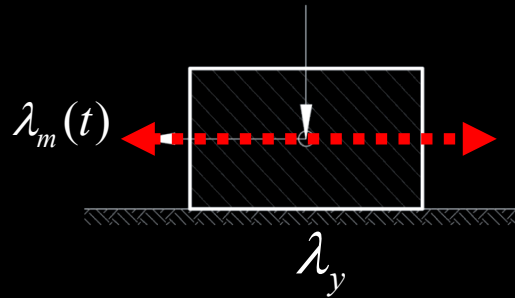
$$f_w = \frac{\alpha}{2} \left(\frac{H_w}{H_o} \right)^2 \frac{\sin(\beta_o - \beta) \sec(\beta_o)}{\sin(\beta_o - \beta)}$$

Estimación de la Demanda Sísmica

Cálculo de los desplazamientos residuales para un registro sísmico y un nivel de servicio

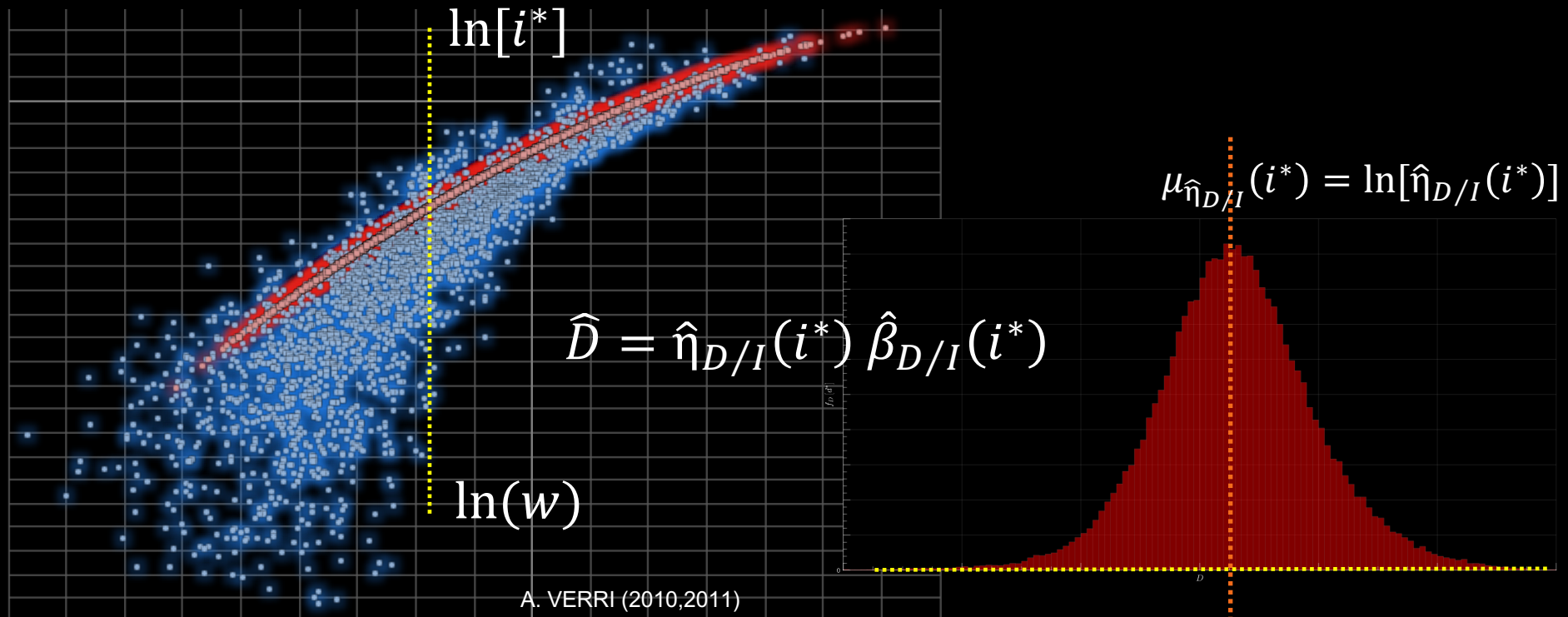
Algoritmo de Newmark

```
function [DN]=GetDN( $\lambda_m$ ,dt,  $\lambda_y$ )
NP=length(AT);
i=0;
TOL=0.0001;
while i<NP-1
    i=i+1;
    if V(i)<TOL
        if abs( $\lambda_m(i)$ )>  $\lambda_y$ 
            N=  $\lambda_m(i)$ /abs( $\lambda_m(i)$ );
        else
            N=  $\lambda_m(i)$ /  $\lambda_y$ ;
        end
    else
        N=1;
    end
    A(i+1)=  $\lambda_m(i)$ *g-N*  $\lambda_y$  *g;
    V(i+1)=V(i)+1/2*dt*A(i)+1/2*dt*A(i+1);
    if V(i+1)<TOL
        V(i+1)=0; A(i+1)=0;
    end
    U(i+1)=U(i)+dt*V(i)+1/3*(dt^2)*A(i)+1/6*(dt^2)*A(i+1);
end
DN=U(end);
end
```



Estimación de la Demanda Sísmica

El modelo proxy es un estimador sesgado de la demanda sísmica \hat{D} a partir de la mediana condicional $\hat{\eta}_{D/I}$ y el error condicional $\hat{\beta}_{D/I}$ de los asentamientos

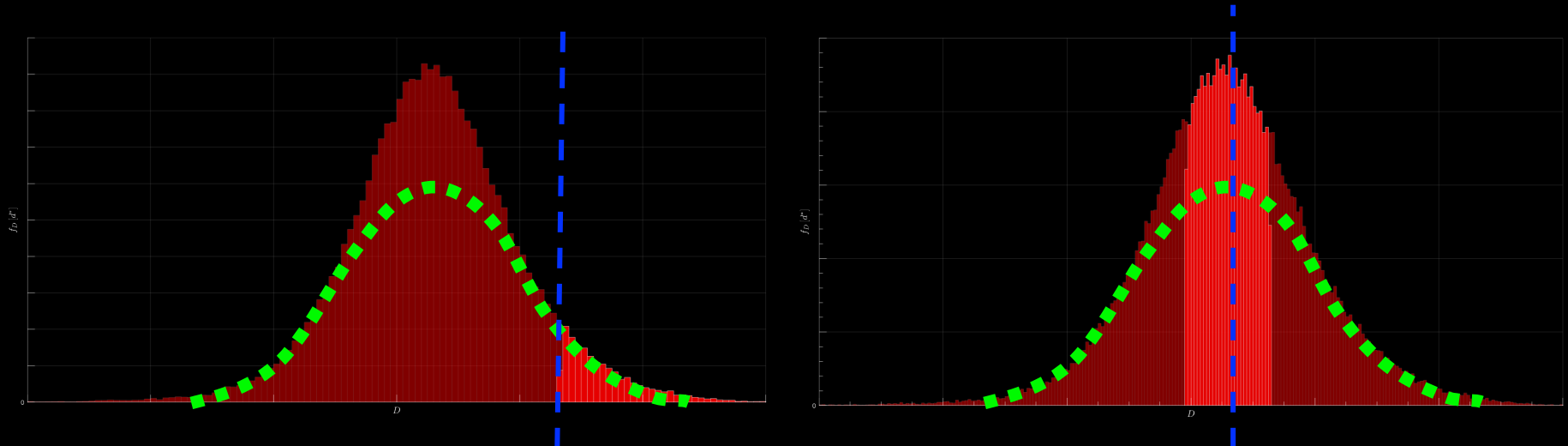


Selección de Sismos de Diseño

- Para el análisis dinámico 2D de presas mediante modelos FEM, deberá emplearse una cuidadosa selección de registros sísmicos que sea representativa de la variabilidad aleatoria del contenido de frecuencias, duración y otros parámetros de intensidad de los sismos esperables en el sitio de emplazamiento

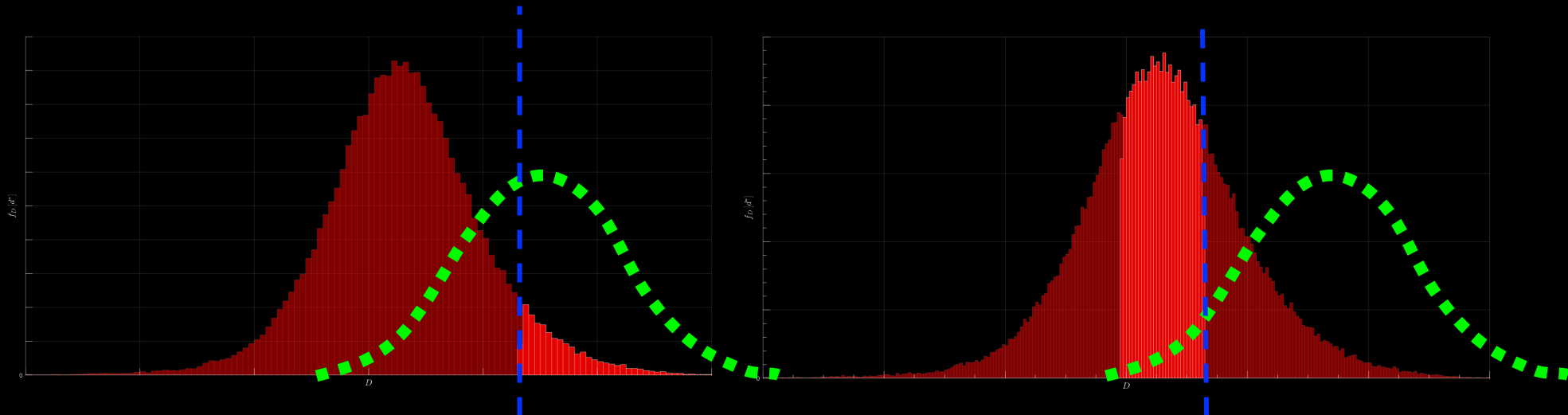
Selección de Sismos de Diseño

- El conjunto de registros podrán elegirse en principio, como representativos del valor más probable para aproximar el valor medio de la respuesta o de los valores máximos



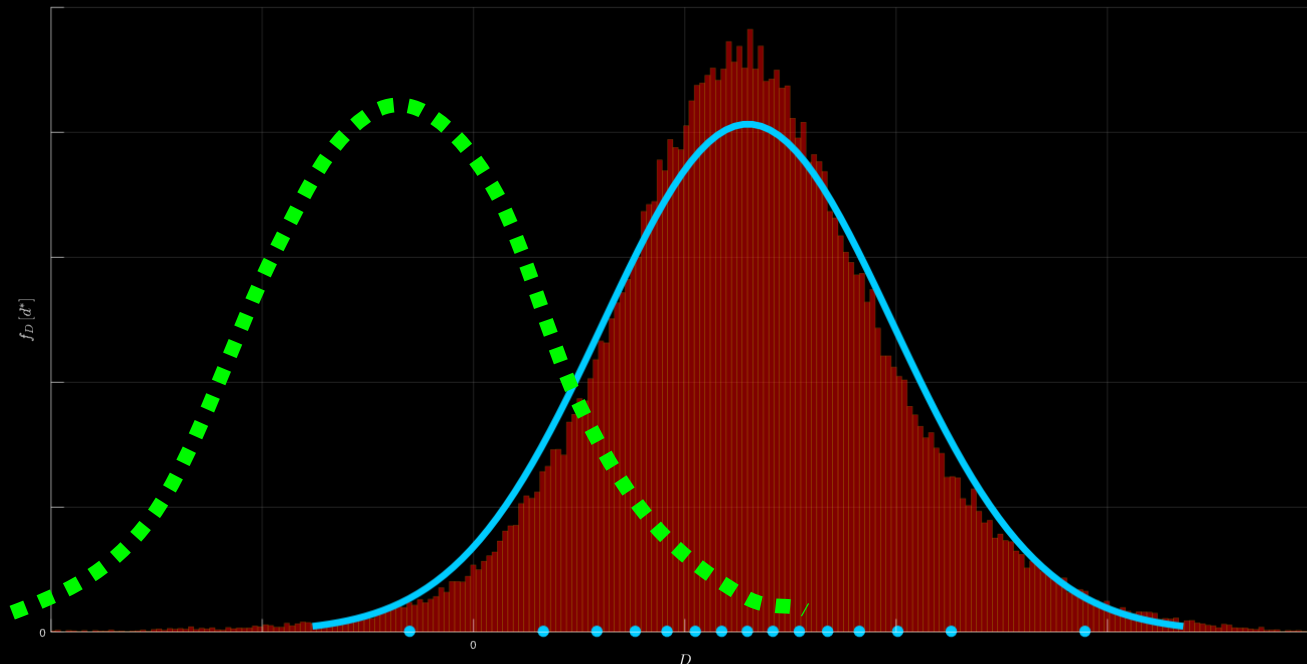
Selección de Sismos de Diseño

- Sin embargo, debido a que el modelo proxy es un modelo sesgado, estos registros no son representativos de los valores más probables



Selección de Sismos de Diseño

- Un procedimiento posible sería aquel que seleccione un sub-conjunto reducido de registros que preserven la variabilidad β_I del conjunto que representa el universo de sismos posibles



Resumen

Definición del sismo máximo de diseño

- Para las presas de alto riesgo, el sismo de diseño deberá determinarse a partir del valor característico de la tasa anual de excedencia AEP para el 84% o 95% de confianza mediante el empleo de árboles lógicos que incorporen los diferentes escenarios de atenuación, recurrencia y zonificación sísmica del sitio del proyecto
- En presas de riesgo moderado el MDE podrá determinarse a partir del valor medio de la AEP, a partir del promedio ponderado de modelos de atenuación y los valores medios de parámetros de recurrencia y zonificación

Resumen

Selección de Sismos de Diseño

- Para el análisis dinámico 2D de presas mediante modelos FEM, deberán emplearse un conjunto de registros sísmicos que sea representativo de la variabilidad aleatoria de la respuesta dinámica de la presa en términos de asentamientos residuales
- Los registros sísmicos podrán seleccionarse a partir de una estimación previa de la demanda sísmica para un gran número de registros escalados al MDE y preseleccionados de acuerdo a la desagregación de la amenaza