

CONFERENCIA

**DÍA MUNDIAL DEL AGUA**

# MODELAMIENTO NUMÉRICO 3D DE UNA PRESA DE GRAN ALTURA CON ALMACENAMIENTO DE RELAVES

**Dr. Ing. Samuel Ismael Quisca Astocahuana**

SQ & Ingenieros Consultores Constructores SRL,

Profesor Visitante del Postgrado UNALM, Perú,

[squisca@gmail.com](mailto:squisca@gmail.com)

## 1.0 INTRODUCCIÓN

- Actualmente, se dispone de numerosos modelos numéricos y softwares desarrollados y disponibles para el modelamiento y simulación de la rotura de las presas de almacenamiento de agua. Sin embargo, estas herramientas ingenieriles son limitadas a determinados tipos de presas de tierra y enrocado de composición simple (presas de cuerpo de materiales sueltos homogéneos o presas de materiales sueltos con núcleo central impermeable).
- Los mecanismos usuales de rotura como rotura por rebose o por tubificación, tienen limitaciones de aplicabilidad a los recientes tipo de presas de materiales sueltos, como la presa CFRD, que tiene la particularidad de tener una pantalla en el talud de aguas arriba, o a las presas de tierra y enrocado que tienen una composición compuesta de los materiales del cuerpo de la presa, pues los conocidos programas computacionales de rotura de presas no son aplicables. Estos programas tienen la finalidad de predecir el hidrograma de la onda de rotura de la presa y el tránsito de la onda de rotura hacia aguas abajo de la presa, para determinar la extensión y características de las afectaciones o inundaciones. Estas predicciones se realizan en función del tipo de presa, mecanismo de rotura de la presa, y el tamaño de la brecha o abertura de rotura, así como las características topológicas de las zonas potenciales de afectación.

## 1.0 INTRODUCCIÓN (continuación....)

- En el caso del modelamiento y simulación numérica de la rotura de las presas de relaves, el proceso físico de la rotura de una presa de relaves es aún más complejo que el proceso de rotura de una presa de almacenamiento de agua. De hecho, autores como Blight (1997), Jeyapalan et al. (1983), Rico et al. (2007, 2008) y Clemente et al. (2013), reportan sobre la carencia de metodologías y programas computacionales específicos para el modelamiento de la rotura para los diferentes tipos de presas de relaves, confirman la necesidad de realizar investigaciones sobre el tema.
- El modelamiento del proceso de rotura de una presa de relaves depende principalmente de las características del depósito de relaves, de la presa de retención, y de las propiedades reológicas de los relaves en reposo y en movimiento (flujo no-newtoniano).
- En función de la concentración volumétrica de sólidos con respecto al agua, la reología del depósito de relaves varía de flujo hiperconcentrado, flujo de barro o flujos con reología friccionante. En caso que se disponga de una presa de tierra y enrocado para la conformación del depósito de relaves, el flujo de la rotura de la presa de relaves puede alcanzar condiciones de hasta flujos de huaycos y de avalanchas de rocas, dependiendo del contenido o disponibilidad del agua durante el proceso de rotura de la presa de relaves.
- En el caso de las presas de relaves convencionales, los mecanismos de rotura usuales son por rebose, licuación de suelos, tubificación, deslizamientos y otros. Recientemente, se están utilizando depósitos de relaves con bajo contenido de agua, como es el caso de depósitos de relaves filtrados, que no requieren de una presa de retención, y tienen un bajo contenido de aguas durante su disposición, lo que hace que su mecanismo de rotura sea más complejo, y que el flujo o movimiento de los materiales desprendidos por la rotura sean predominantemente modelos reológicos friccionantes, a menos que una fuente de agua cambie la reología de su movimiento, o la rotura se produzca durante un día con lluvia intensa.



**COPEGP**  
**COMITE PERUANO**  
**DE GRANDES PRESAS**



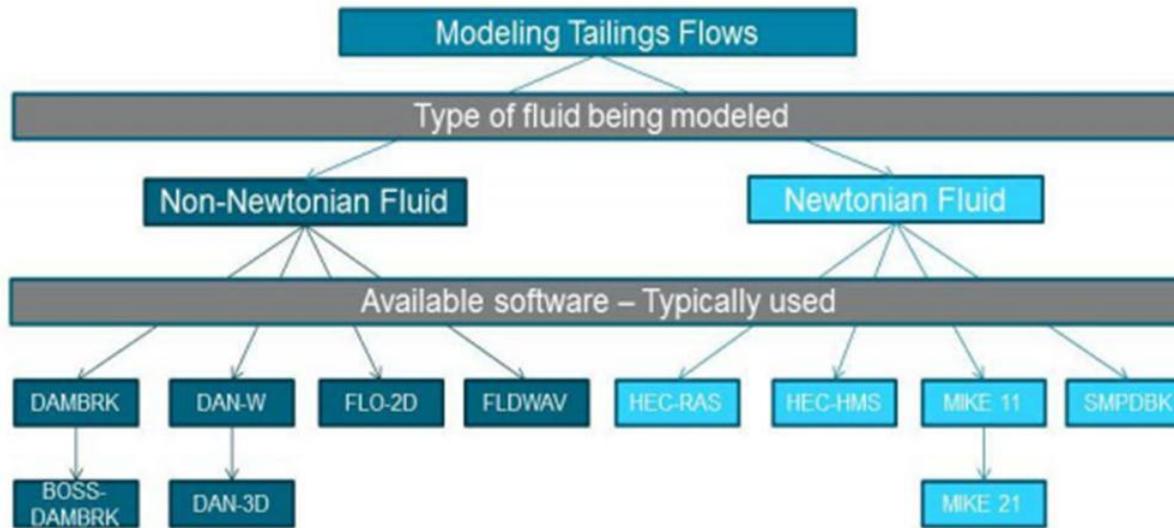
## 1.0 INTRODUCCIÓN (continuación....)

- La simulación numérica de la propagación de la onda de rotura de la presa de relaves puede realizarse aplicando el software disponible para el modelamiento y simulación de los flujos hiperconcentrados, flujos de huaycos o flujos friccionantes. Con los resultados de las simulaciones numéricas se deben elaborar los mapas de vulnerabilidad y riesgos por rotura de la presa de relaves. En base a estos mapas, se formularán las medidas estructurales y no-estructurales para la prevención y mitigación de los potenciales daños por la hipotética rotura de la presa y/o depósito de relaves.
- El presente trabajo reporta una metodología para determinar el mecanismo de rotura de presas y/o depósitos de relaves deshumedecidos o filtrados (con bajo contenido de agua), como una alternativa al uso actual de las metodologías y programas de cómputo válidas para las presas de agua. Se aplican modelos numéricos tridimensionales en la determinación del mecanismo de rotura de presas y/o depósitos de relaves deshumedecidos o filtrados, para establecer las dimensiones de la abertura de rotura y volumen del material desprendido por rotura de la presa y/o depósito de relaves. La metodología propuesta permite modelar el proceso de rotura de las presas o depósitos de relaves con una mejor aproximación, y estimar con mayor precisión el hidrograma de la onda de rotura, así como la estimación de las áreas afectadas en aguas abajo de la presa de relaves.

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS

- En el Gráfico 1, se muestran los modelos de rotura de presa y tránsito de la onda de rotura de presa para fluidos Newtonianos y No-Newtonianos, utilizados actualmente para el estudio de rotura de las presas y/o depósito de relaves. En el presente estudio se utilizó el software FLAC3D Versión 5.01 (Licencia 242-051-0003, key # 10170, SQ & ICC.), que es un software de modelamiento numérico tridimensional, que simula el comportamiento de estructuras de tres dimensiones, que incluyan materiales de suelos, rocas u otros materiales que puedan presentar un comportamiento plástico cuando alcanzan sus límites de fluencia. En nuestro caso, se realizó un análisis de esfuerzo-deformación bajo la acción de una carga sísmica horizontal sobre el dominio computacional, orientado a identificar la zona crítica de máximas deformaciones y velocidades de deformación, considerando los estados de carga actuantes en el dominio computacional y la acción sísmica.

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)



**Gráfico 1.-** Modelos de rotura de presa y tránsito de la onda de rotura de presa para fluidos Newtonianos y No-Newtonianos. Clemente et al. (2013)

- Se analizan dos casos de rotura de presa o depósito de relaves: Caso 1, presa con depósito de relaves deshumedecido; Caso 2, depósito de relaves filtrados (sin presa). En la Figura 1, se muestran la discretización del dominio computacional tridimensional de la presa del depósito de relaves deshumedecido, y del depósito de relaves filtrado.

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.1 Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:

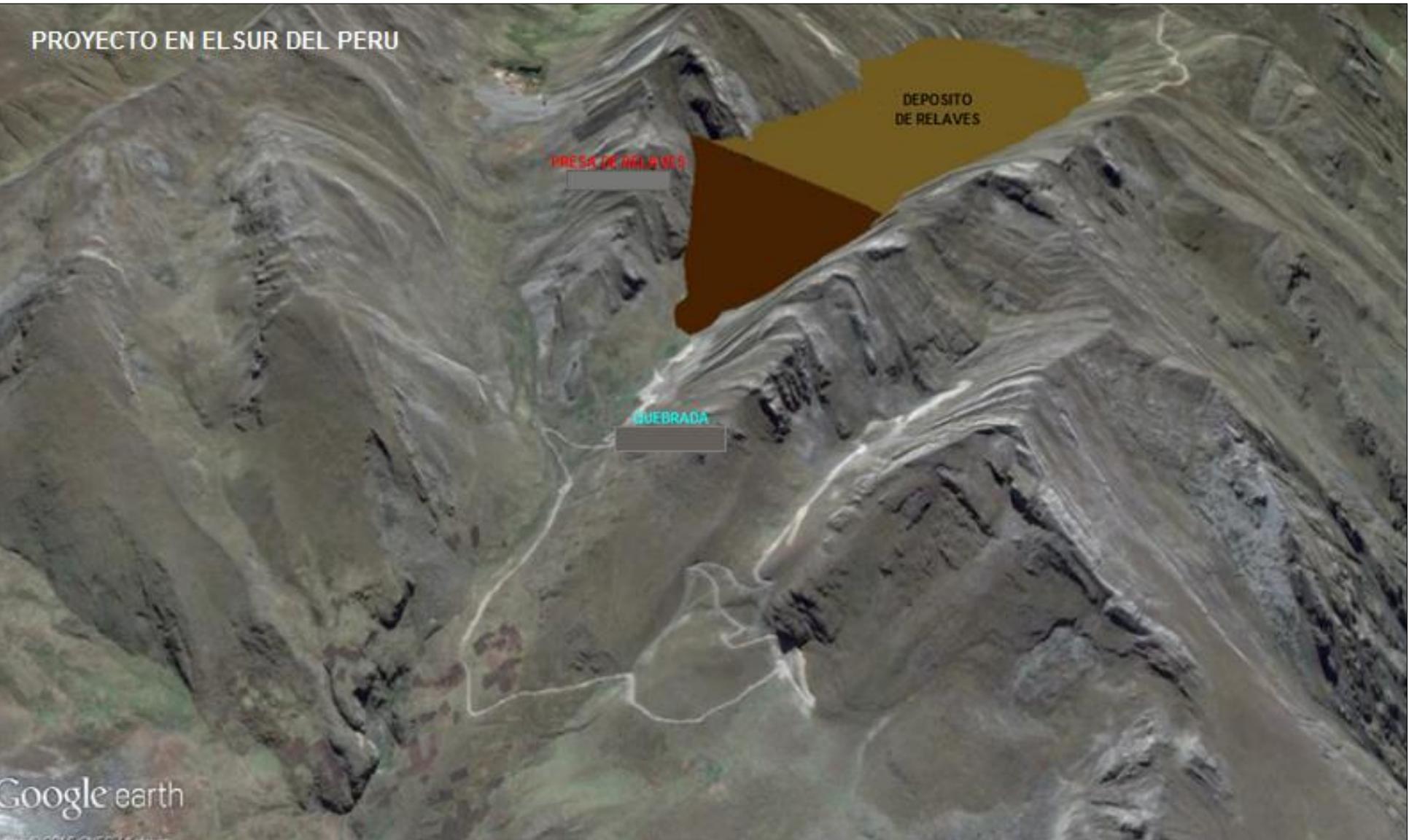
- El cuerpo de la presa es de enrocado con tierra, y el material del Depósito de Relaves será conformado con materiales de relaves deshumedecido, cuyos valores de parámetros de resistencia son mayores con respecto a los parámetros de los relaves convencionales. Para determinar el volumen de materiales del cuerpo de la presa y del volumen de relaves que se desprendería por la hipotética rotura de la presa del Depósito de Relaves, considerando la acción sísmica, se estableció el modelo geotécnico de la presa, relaves y fundación, a fin de construir el modelo numérico tridimensional con el software FLAC-3D.
- Se consideró un modelo de Mor para el cuerpo de la presa y el modelo elástico para la fundación de la presa. Los parámetros geotécnicos utilizados en el cuerpo de la presa fueron: densidad 1700, módulo de rigidez al corte (shear elastic modulus)  $G$  de  $10^8$ , módulo volumétrico elástico (elastic bulk modulus)  $K$  de  $2 \times 10^8$ . En la fundación de la presa: densidad 2100,  $G$  de  $5 \times 10^8$  y  $K$  de  $1 \times 10^8$ . La aceleración sísmica horizontal utilizada en el modelo fue de 0.22g.

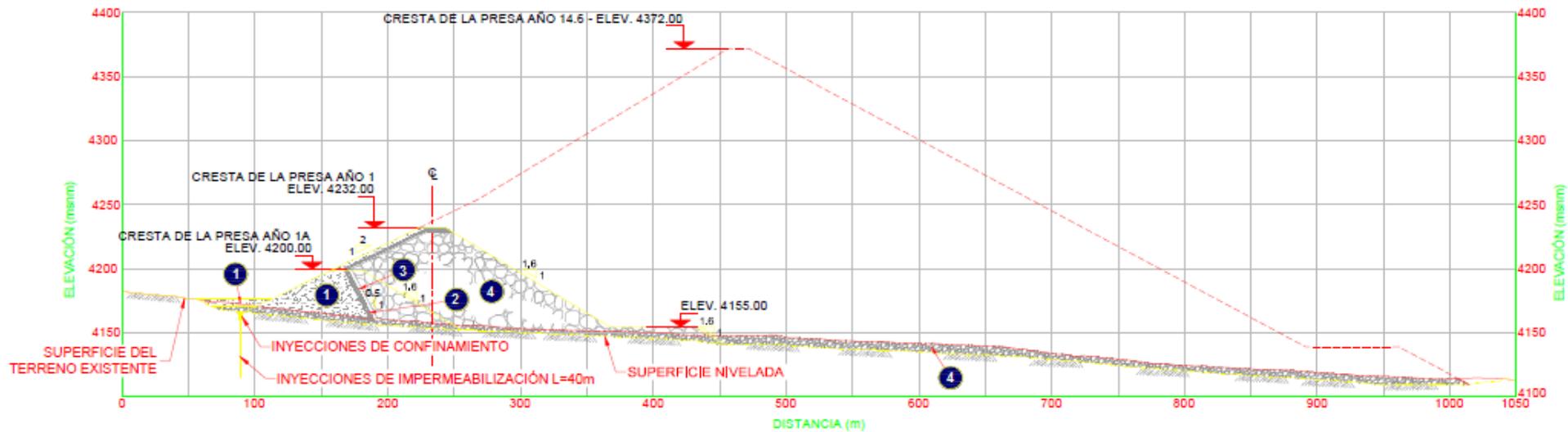
PROYECTO EN EL SUR DEL PERU

PRESA DE ANILIMBO

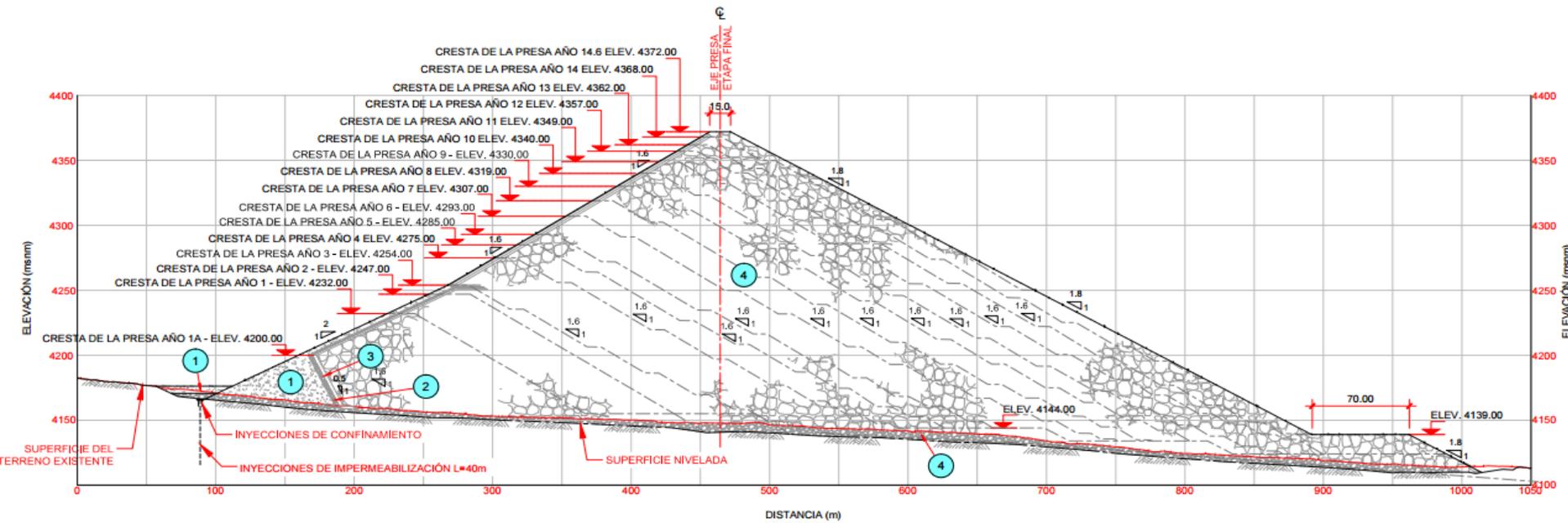
DEPOSITO DE RELAVES

QUEBRADA





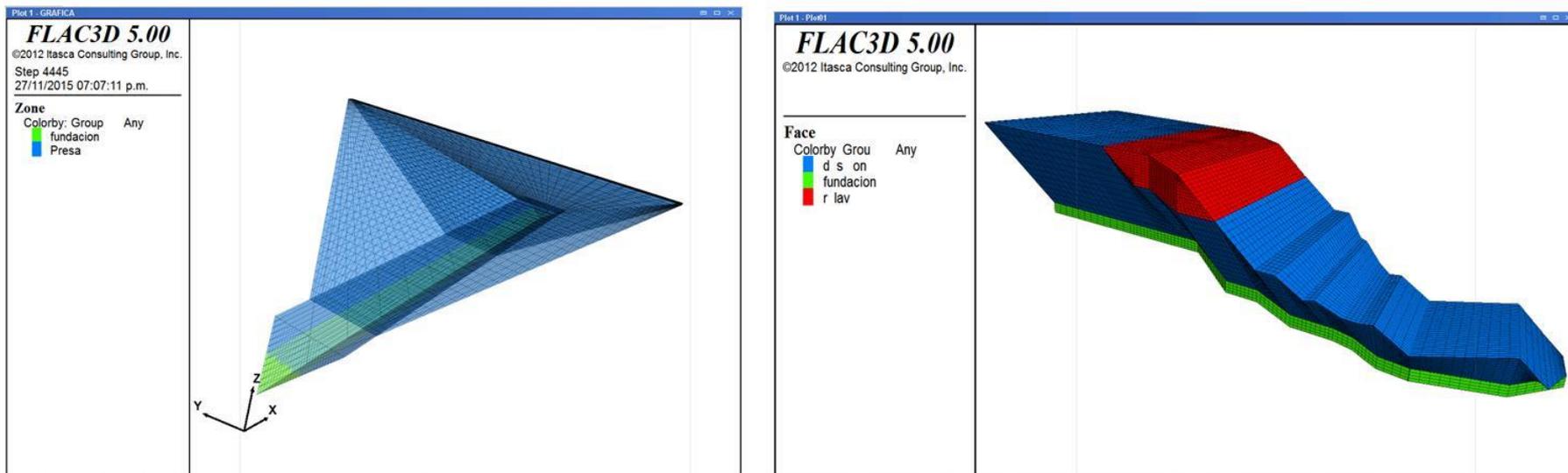
LISTADO DE MATERIALES					
MATERIAL	FUNCION	DESCRIPCION	TAMAÑO MÁXIMO (mm)	ESPESOR MÁXIMO DE CAPA (m)	EQUIPO DE COMPACTACION
①	RELLENO DE BAJA PERMEABILIDAD	MORRENA	150	0.3	RODILLO VIBRATORIO DE 10t
②	FILTRO	GRAVA Y ARENA SELECCIONADO Y PROCESADO	75	0.5	RODILLO VIBRATORIO DE 10t



## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.1 Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:

- Se realizaron las simulaciones numéricas para calcular las deformaciones máximas y su ubicación dentro del cuerpo de la presa, a fin de identificar la zona crítica de formación de la abertura de rotura de la presa de relaves, que tiene una geometría tridimensional.



**Figura 1.-** Discretización del dominio computacional de la presa del depósito de relaves deshumedecido (figura superior). Discretización del dominio computacional total del Depósito de Desmorte de Mina y del Relave Filtrado (figura inferior).

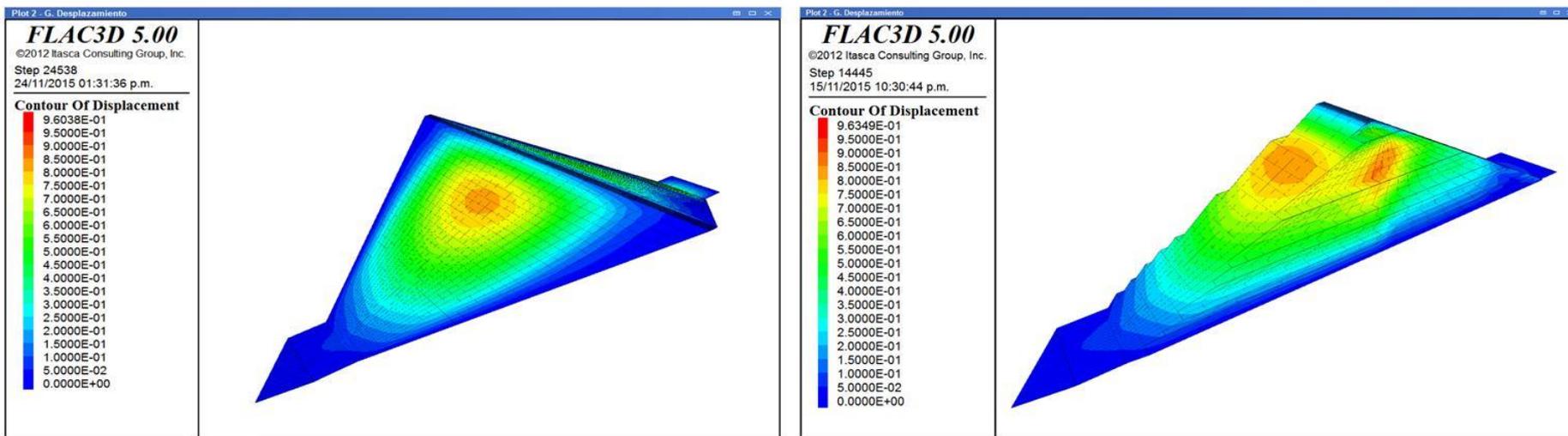
## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.1 Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:

- Los resultados de las simulaciones numéricas con FLAC-3D, indican que la zona de concentración de máximas deformaciones se localiza en la parte central superior del cuerpo de la presa, tal como se muestran en la Figura 2 (izquierda). En esta zona con desplazamiento máximo de 0.85 m (cercano a 1 m), se formaría la brecha o abertura de la hipotética rotura de la presa del Depósito de Relaves. En la Figura 2 (derecha), se muestra la visualización 3D de la abertura de rotura de la presa. La Figura 3 (izquierda) presenta la salida gráfica del campo de velocidades, que concentra sus velocidades máximas en la parte central de la cresta de la presa (velocidad máxima de 7.5 mm/minuto). Con fines de validación de los resultados de las simulaciones numéricas, se removió la berma estabilizadora localizada el pie del talud de aguas abajo de la presa. El resultado para este escenario, mostró el desplazamiento de la zona de concentración de las máximas deformaciones hacia la parte central inferior del cuerpo de la presa, con el consecuente aumento del volumen de la abertura de la hipotética rotura de presa, Ver Figura 3 (derecha).

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

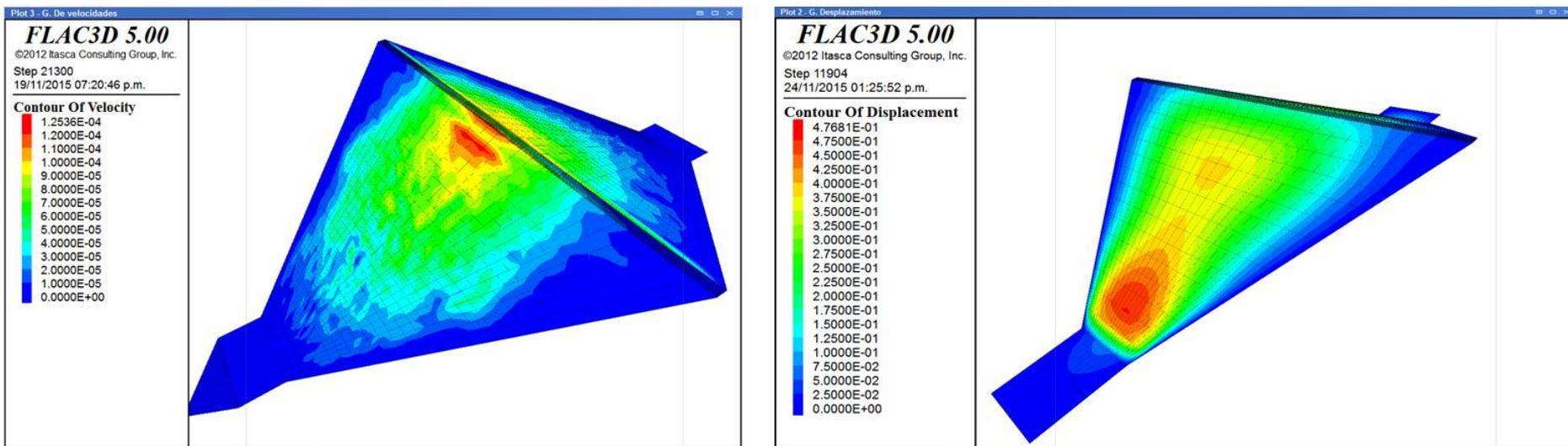
### 2.1 Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:



**Figura 2.-** Resultados de las deformaciones máximas en el cuerpo de la presa del Depósito de Relaves, bajo cargas del depósito de relaves deshumedecido y la acción sísmica  $a_x = 0.22g$  (izquierda). Vista 3D del sector de la formación de la abertura de rotura en el cuerpo de la presa de relaves (derecha).

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.1 Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:



**Figura 3.-** Campo de velocidades máximas en el cuerpo de la presa del Depósito de Relaves, bajo cargas del depósito de relaves y la acción sísmica  $a_x = 0.22g$  (izquierda). Escenario sin berma en el pie inferior de la presa, donde se muestra la ubicación del sector de las deformaciones máximas en el cuerpo de una presa de relaves, bajo cargas del depósito de relaves y la acción sísmica  $a_x = 0.22g$  (derecha).

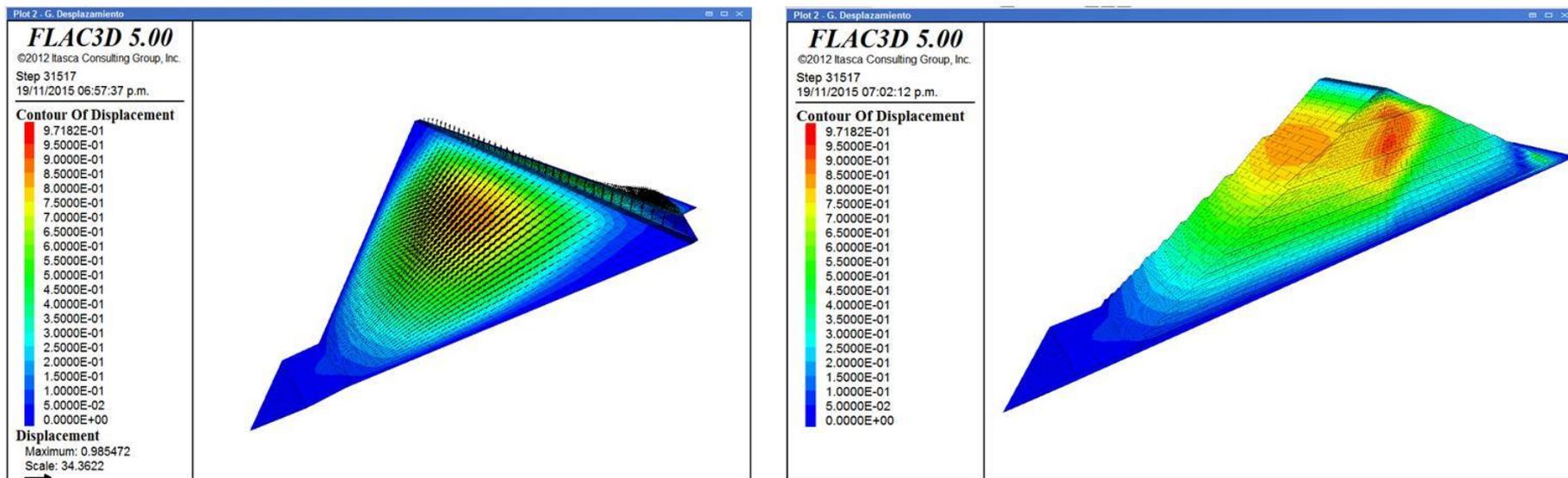
## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.1 Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:

- Se evaluó la variación de la ubicación del sector de deformaciones máximas en el cuerpo de la presa con respecto a la variación de la aceleración sísmica horizontal, encontrando una coherencia física de los resultados. En la Figura 4 (izquierda), se muestra el campo vectorial de los desplazamientos máximos en el cuerpo de la presa, para la aceleración sísmica  $a_x = 0.25g$ , donde se observa que el sector de máximos desplazamiento bajo ligeramente con respecto a los resultados correspondientes a  $a_x = 0.22g$ . La Figura 4 (derecha) presenta la visualización 3D del sector de máximos desplazamientos o abertura de rotura de la presa, donde se observa un aumento del volumen de rotura.

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

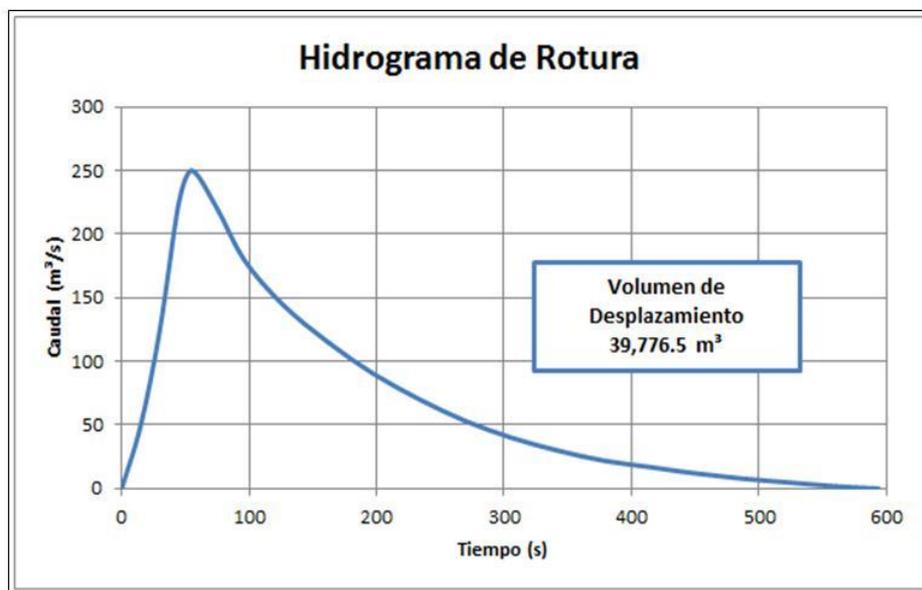
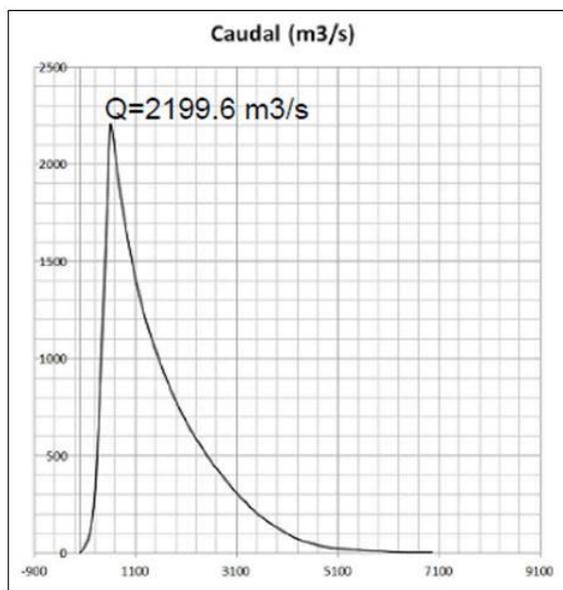
### 2.1) Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:



**Figura 4.-** Campo vectorial de las deformaciones máximas (izquierda). Vista del corte 3D del sector de formación de la abertura de rotura de la presa de relaves deshumedecido (derecha). Escenario de aceleración sísmica  $a_x = 0.25g$ .

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.1 Modelo geotécnico y resultados del Caso 1 - Presa del depósito de relaves deshumedecido:



**Figura 5.-** Hidrograma de la onda de rotura de la presa del depósito de relaves deshumedecido (izquierda). Hidrograma de la onda de rotura del depósito de relaves filtrado (derecha).

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.2 Modelo geotécnico y resultados del Caso 2 - Depósito de relaves filtrado:

- El depósito de relaves filtrado está conformado por el material de fundación, el depósito de desmote de mina existente, y sobre esta se ubica el relave filtrado proyectado. El depósito de desmote de mina presenta una geometría asimétrica de forma longitudinal en la dirección del cauce de la quebrada. La geometría se ha modelado como bloques rectos, que siguen la orientación de la estructura, y en las zonas laterales y aguas arriba se ha truncado la geometría con un plano vertical. Se han utilizado elementos de forma hexagonal y triangular de tamaño uniforme. En la Figura 1 (figura inferior), se muestra el ploteo del mallado tridimensional generado para la geometría total del depósito de desmote de mina, y del relave filtrado (color rojo). Se consideró un modelo elástico para la fundación, el modelo de Mohr-Coulomb para el cuerpo del desmote de mina y el cuerpo del relave filtrado. Los parámetros geotécnicos utilizados en el modelamiento y las simulaciones numéricas de escenarios, se presentan en el Cuadro 1.

**Cuadro 2.3.-** Modelo y parámetros geotécnicos de la roca de fundación, desmote de mina y del relave filtrado

Variable	Modelo	Propiedades		Parámetros Elásticos				Parámetros Plásticos	
	Constitutivo	$\gamma$	$\rho$	E	$\nu$	G	K	c	$\phi$
Und.		N/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Pa	[ ]	Pa	Pa	Pa	°
<b>Desmote</b>	Mohr -	21000	2140.67	1.60E+08	0.31	6.11E+07	1.40E+08	4.00E+03	39
<b>Relave</b>	Coulumb	20000	2038.74	7.50E+07	0.35	2.78E+07	8.33E+07	2.50E+04	30
<b>Fundación</b>	Elastico	26800	2731.91	3.00E+10	0.22	1.23E+10	1.79E+10		

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.2) Modelo geotécnico y resultados del Caso 2 - Depósito de relaves filtrado:

- Las simulaciones numéricas con el software FLAC-3D, analizaron escenarios para un rango de valores de aceleración sísmica horizontal, que varía de 0.15g a 0.18g, obteniéndose valores máximos de desplazamiento en el cuerpo del relave de 0.12 m a valores mayores de 5 m, respectivamente. El proceso del análisis numérico fue el siguiente:
- 1) Equilibrio estático: Se resuelve un primer análisis bajo condiciones estáticas gravitatorias, y las propiedades de los materiales exagerados en su resistencia plástica, para evitar cualquier esfuerzo de corte inicial. Asimismo, se aplican las siguientes condiciones de contorno:
  - Sobre la superficie inferior del material de fundación, se asigna una condición de no movimiento ante cualquier esfuerzo desviador.
  - Sobre las superficies laterales, una condición de impedimento de movimiento en la dirección normal al plano.

De esta forma, el modelo alcanza el equilibrio con esfuerzos de corte cero en las superficies de contorno, bajo las aceleraciones:  $a_x=0$ ;  $a_y \neq 0$ ;  $a_z=10 \text{ m}^2/\text{s}$ .

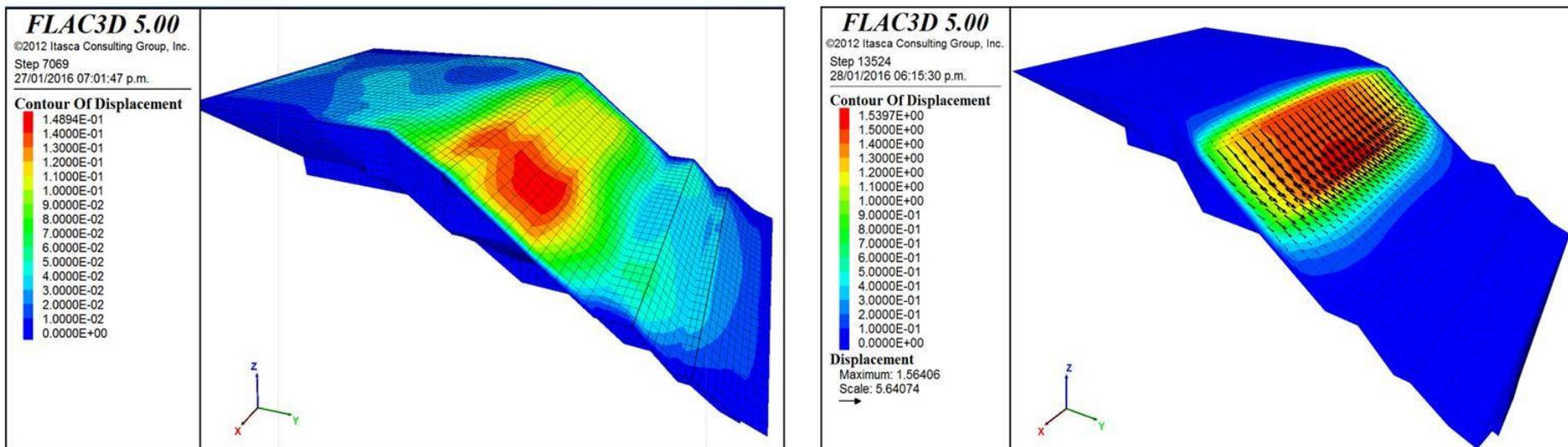
## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.2 Modelo geotécnico y resultados del Caso 2 - Depósito de relaves filtrado:

- 2) Análisis Esfuerzo Deformación – Pseudoestático: En esta fase final, se sincera las propiedades de resistencia de los materiales, y se aplican las condiciones de carga propias del modelo. Las condiciones de contorno se fijan en todos los bordes, en las direcciones x, y, z, lo que implica una interfaz rígida entre las superficies del modelo y el medio de fundación. El material de fundación se asume elástico.
- En la Figura 6 (izquierda), se presenta la salida gráfica de resultados del análisis de rotura del depósito de relaves filtrados, bajo la aceleración horizontal de  $a_y=1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ ; se observa que la zona de mayor concentración de desplazamientos se localiza en la margen derecha del talud frontal del depósito de relaves analizado. La Figura 6 (derecha), muestra el campo de desplazamientos tridimensional del depósito de relaves filtrados, considerando las aceleraciones:  $a_x=0$ ;  $a_y=1.75 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $a_z=10 \text{ m}^2/\text{s}$ . Conforme se incrementa el valor de la aceleración horizontal, la zona de mayor concentración de desplazamiento se localiza hacia la parte central del talud frontal del referido depósito de relaves, siendo el escenario crítico para deformaciones en el cuerpo del depósito de relaves, cuando el desplazamiento es mayor de 1 m, que corresponde al escenario con aceleración horizontal de  $1.75 \text{ m}^2/\text{s}$ . Efectivamente, en la Figura 6 (derecha), se observa que el campo de los vectores de desplazamientos son mayores de 1 m en toda la zona del talud frontal del depósito de relaves filtrados. En esta zona se formaría la zona de desprendimiento o deslizamiento de material del relave, por la hipotética rotura del depósito de relaves.

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.2 Modelo geotécnico y resultados del Caso 2 - Depósito de relaves filtrado:

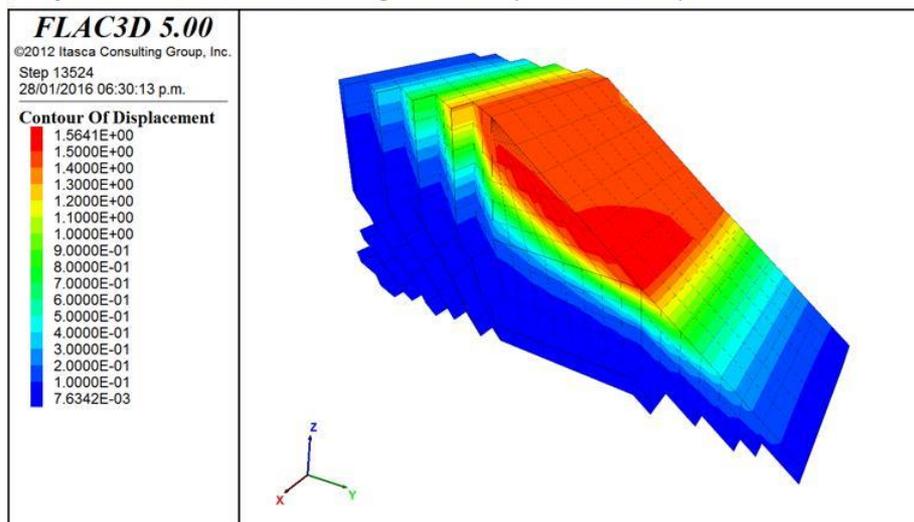


**Figura 6.-** Salida gráfica de resultados de las deformaciones máximas, para aceleración horizontal  $a_y = 1.5 \text{ m}^2/\text{s}$  (izquierda). Vista 3D del campo vectorial de las deformaciones máximas en la zona de rotura del depósito de relaves filtrado, para aceleraciones  $a_x = 0$ ;  $a_y = 1.75 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $a_z = 10 \text{ m}^2/\text{s}$  (derecha).

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.2 Modelo geotécnico y resultados del Caso 2 - Depósito de relaves filtrado:

- En la Figura 7, se muestra el corte tridimensional del depósito de relaves, donde se muestra la profundidad del campo de desplazamientos mayores de 1 m, que define el volumen del material de relave desprendido por la hipotética rotura del depósito de relaves filtrados. El hidrograma de la onda de rotura del depósito de relaves filtrado se presenta en la Figura 5 (derecha).

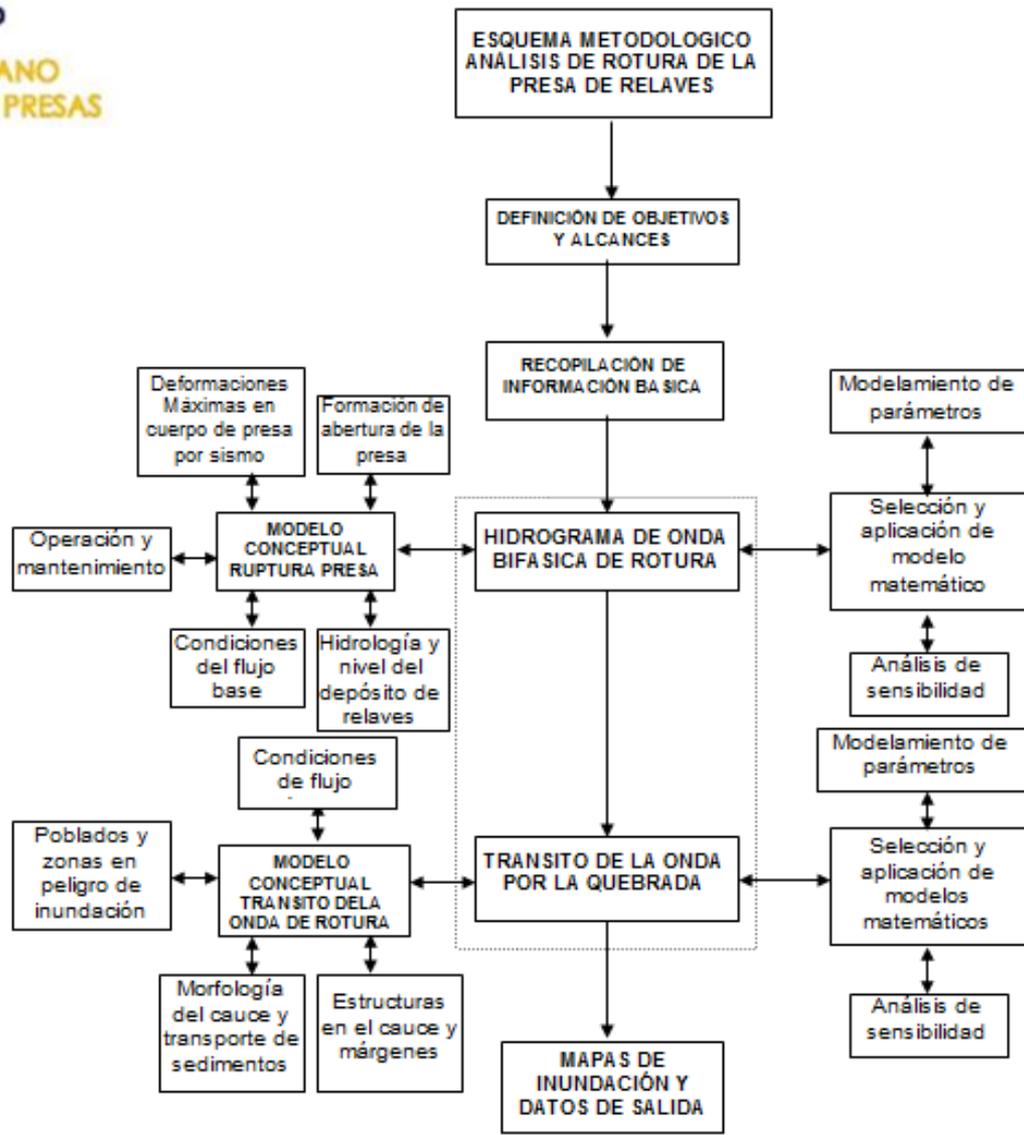


**Figura 7.-** Perfil de corte del campo de desplazamientos del depósito de relaves filtrados, considerando las aceleraciones:  $a_x=0$ ;  $a_y=1.75 \text{ m}^2/\text{s}$ ;  $a_z=10 \text{ m}^2/\text{s}$ .

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.3 Modelo reológico y la propagación de la onda de rotura de la presa del depósito de relaves deshumedecido, y del depósito de relaves filtrado:

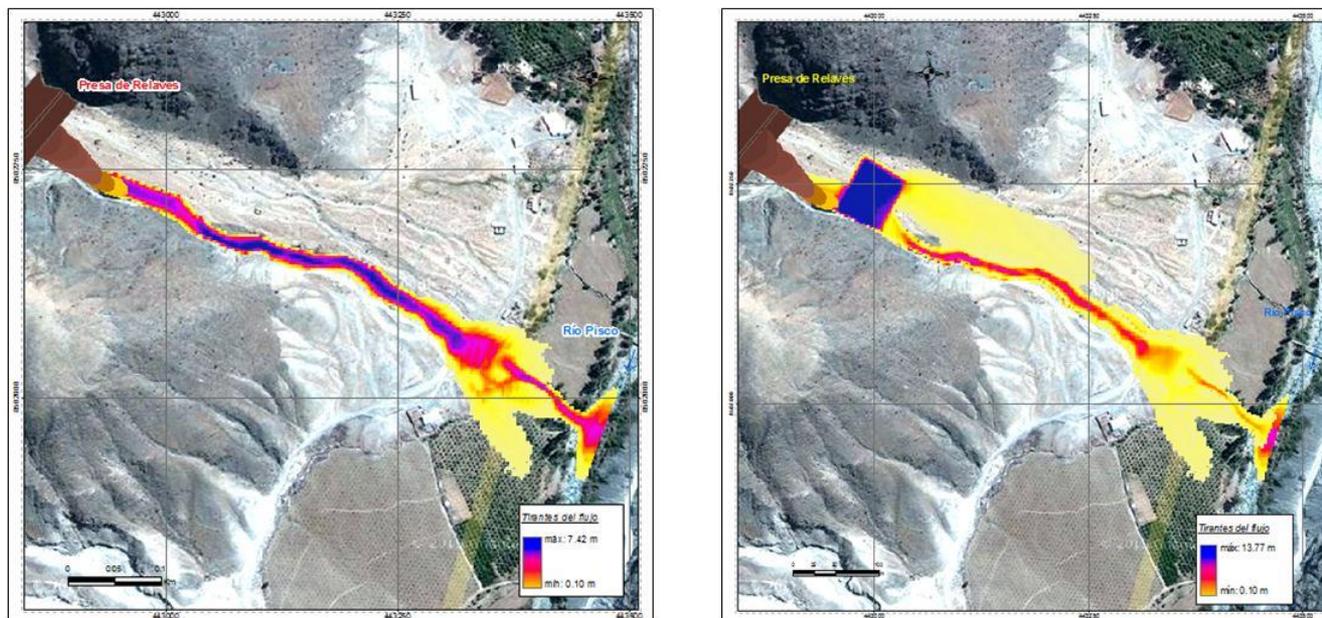
- En base a la información topográfica de la quebrada, desde el sitio de emplazamiento de la presa del Depósito de Relaves Deshumedecido, o del Depósito de Relaves Filtrado (ubicado sobre el Depósito de Desmonte de Mina), hacia aguas debajo de la quebrada, se procedió a la discretización topológica e hidráulica de la quebrada para la construcción del dominio computacional del tránsito o propagación de la onda de rotura. Se evaluaron tres modelos reológicos: modelo de Bingham, modelo de Voellmy, y el modelo cuadrático de O'Brian y Julien.
- El material desprendido de la presa del depósito de relaves deshumedecido o depósito de relaves filtrados, se desplazará hacia aguas abajo, por el cauce del río o quebrada. Dado que el material del depósito de relaves tiene bajo contenido de humedad, y el cauce de la quebrada usualmente se encuentra seco (o con descargas del sistema de drenaje del depósito de desmonte de mina), el tránsito de los materiales de la onda de rotura posee un modelo reológico predominantemente friccional. Los resultados muestran que la distancia de propagación del frente de onda del material de rotura, alcanza una distancia mucho menor que la distancia alcanzada por un flujo hiperconcentrado, o de huaycos. El modelo reológico de Voellmy permite obtener distancias de propagación de la onda de rotura más consistente con la física del problema. Los resultados del tránsito de la onda de rotura con el modelo de Bingham son cercanos a los obtenidos con el modelo de Voellmy. Sin embargo, la distancia de propagación de la onda de rotura aplicando el modelo cuadrático de O'Brian y Julien, es mucho mayor a los otros dos modelos reológicos, es decir, produce valores muy conservadores o valores que no tienen consistencia física. En la Figura 8, se muestra la propagación de la onda de rotura por la quebrada sin medida estructural y con medida estructural (poza de retención de sedimentos). Se observa una drástica reducción del tirante.



**Esquema metodológico para el análisis de la rotura de la presa del Depósito de Relaves y la propagación de la onda bifásica de rotura de presa**

## 2.0 METODOLOGÍA Y RESULTADOS (continuación....)

### 2.3 Modelo reológico y la propagación de la onda de rotura de la presa del depósito de relaves deshumedecido, y del depósito de relaves filtrado:



**Figura 8.-** Tirantes de afectación por la propagación de la onda de rotura de la presa de relaves, para un periodo de retorno de 500 años, sin considerar medida estructural (figura izquierda). Tirantes de afectación reducida por la propagación de la onda de rotura con poza de retención de sedimentos en el cono de deyección (figura derecha).

### 5.3 Estudio de riesgos por la rotura del depósito de relaves en la quebrada Honda y formulación de medidas estructurales y no-estructurales de prevención y mitigación (2015)

#### Modelo de Bingham

$$\tau = \tau_y + \mu_B \frac{dv}{dy}$$

$\tau_y$  esfuerzo de cedencia constante  
 $\mu_B$  viscosidad de Bingham

- La reología de Bingham ignora el esfuerzo inercial y asume el flujo como viscoso, aunque es conocido que incluso en los flujos de barro con concentración de volumen mayor a 40%, puede ser turbulento (O'Brien, 1986).
- El modelo de Bingham ( $\tau_y = 75\text{kPa}$  y  $\mu_B = 1.0 \text{ kPa}$ ) muestra una distribución del material consistente, sin embargo, sobreestima la velocidad del flujo ( $V_m=80 \text{ m/s}$ ) y del frente de onda.

#### Modelo de Voellmy

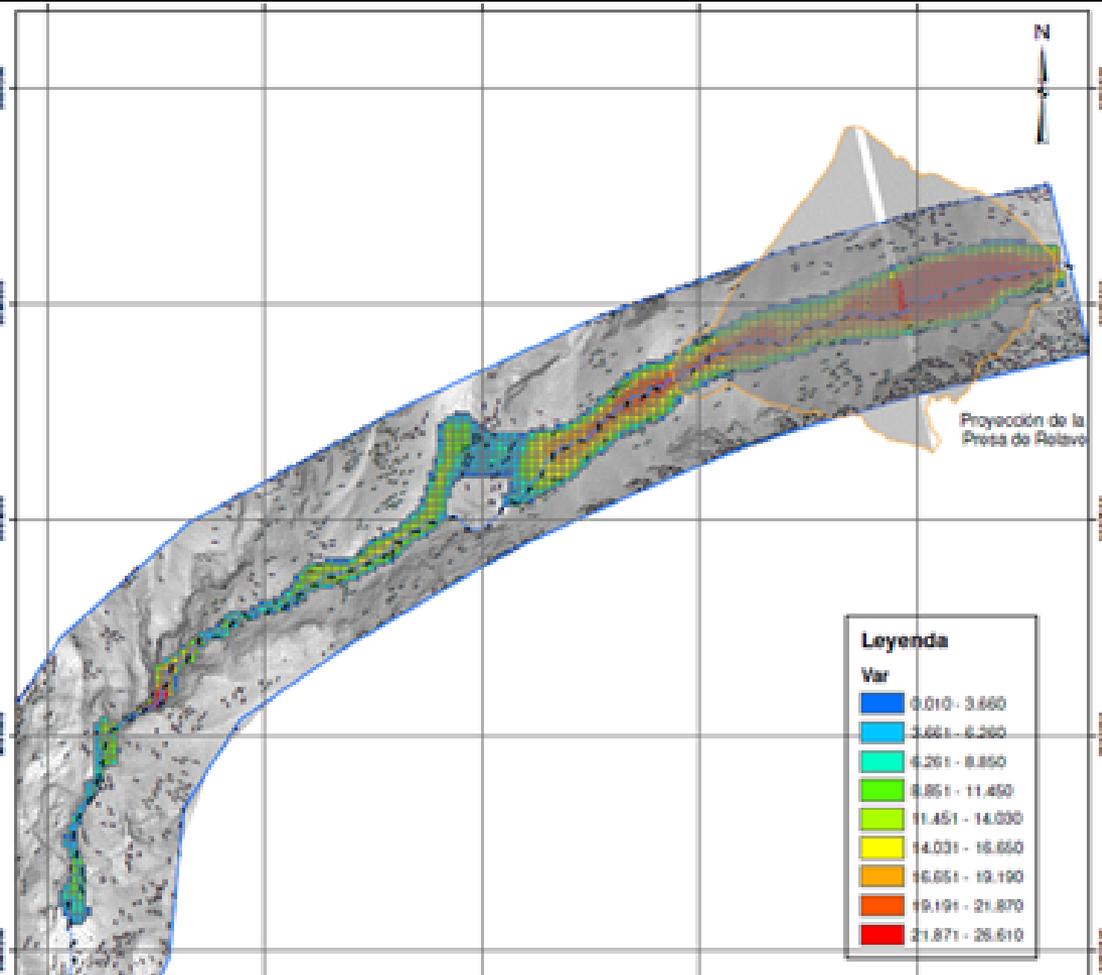
$$\tau = \gamma \cdot H \cdot \left( \cos \alpha + \frac{a_c}{g} \right) \cdot (1 - r_u) \cdot \tan \varphi + \gamma \cdot \frac{v^2}{\xi}$$

$\tau$  resistencia del flujo basal  
 $\gamma$  peso unitario  
 $H$  tirante del flujo normal a la base  
 $\alpha$  ángulo de desviación horizontal (pendiente del canal)  
 $a_c$  aceleración centrífuga  
 $g$  aceleración de la gravedad  
 $r_u$  coeficiente de presión de poros  
 $\varphi$  ángulo de fricción  
 $v$  velocidad  
 $\xi$  coeficiente de turbulencia

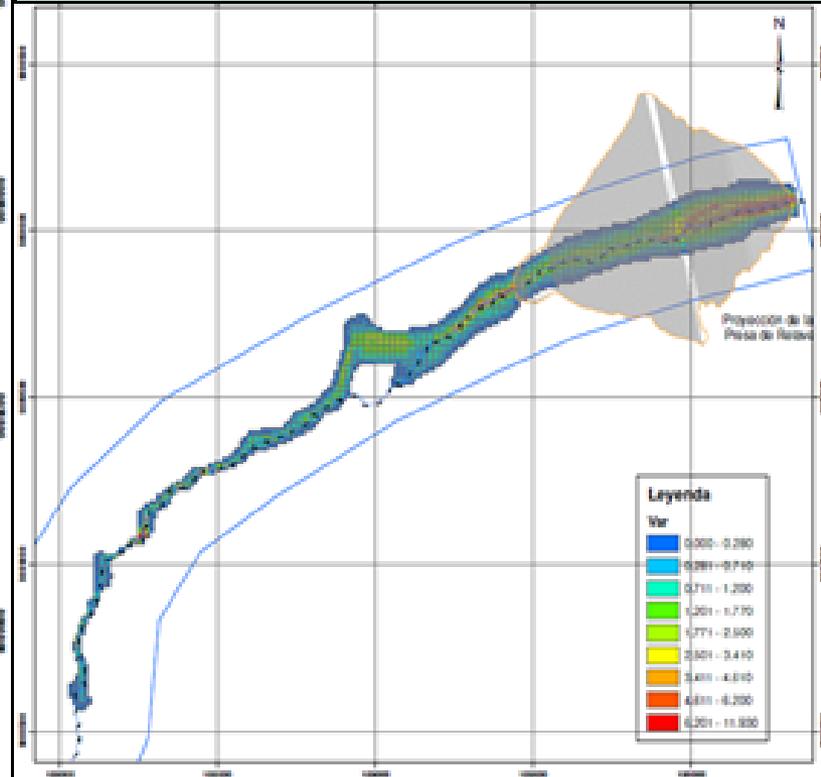
- Las propiedades del material a lo largo de la trayectoria de flujo se asume que el ángulo de fricción  $\varphi$  que oscila entre  $8.5^\circ$  y  $12^\circ$  (coeficiente de fricción entre 0.15 – 0.21), y el coeficiente de turbulencia  $\xi$  varía de  $500 \text{ m/s}^2$  -  $600 \text{ m/s}^2$ .
- El modelo de Voellmy (Coeficiente de fricción=0.2 y  $\xi = 500 \text{ m/s}^2$ ) produce resultados más consistentes en términos del desplazamiento y distribución del flujo, y una velocidad ( $V_m=30\text{m/s}$ ) del flujo, acorde a lo esperado

### 5.3 Estudio de riesgos por la rotura del depósito de relaves en la quebrada Honda y formulación de medidas estructurales y no-estructurales de prevención y mitigación (2015)

Salida gráfica FLO-2D de la simulación numérica de la onda de rotura de la presa del Depósito de Relaves – Tirantes máximos. Avance frente de onda 2.05 km desde el pie de la presa.



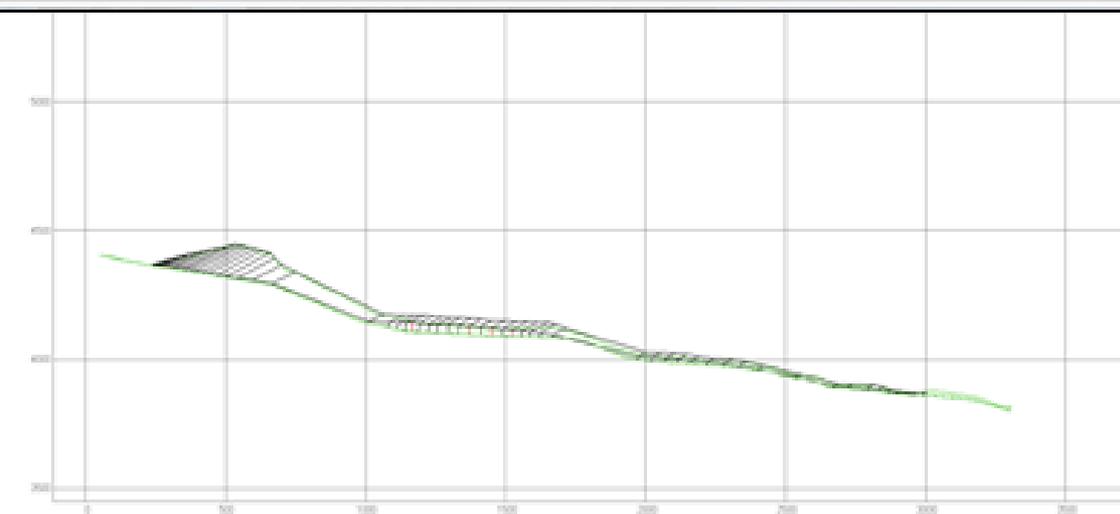
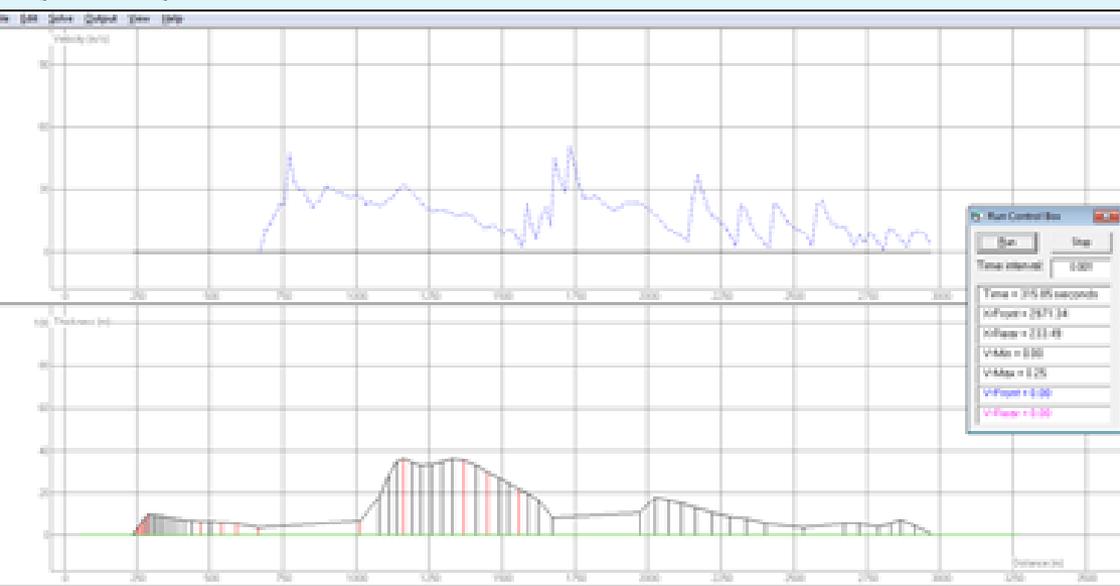
Salida gráfica FLO-2D para la simulación numérica de la onda de rotura de la presa del Depósito de Relaves – Velocidades máximas.



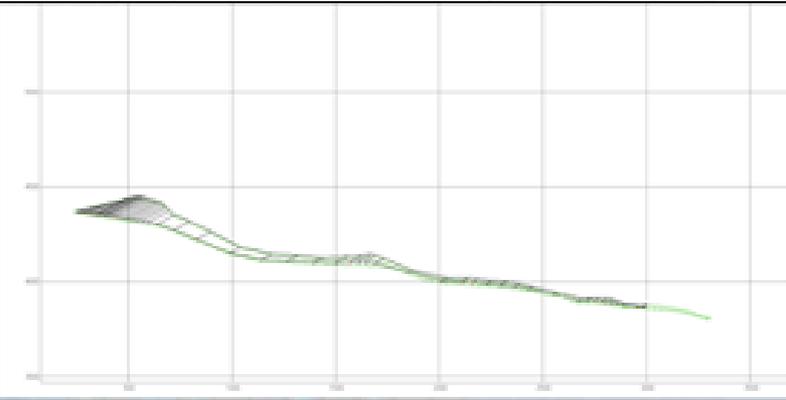
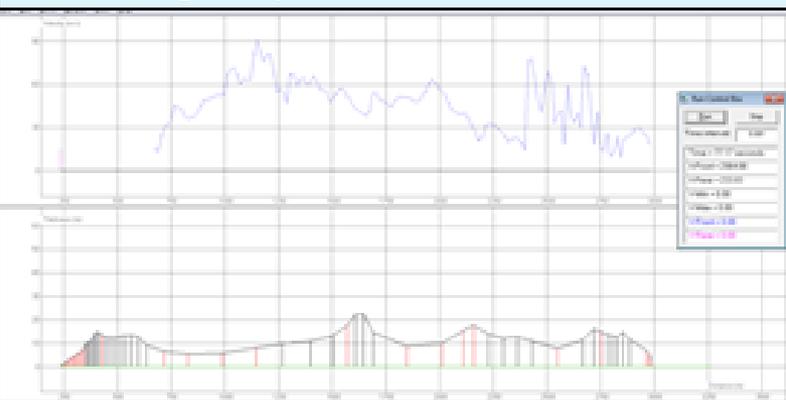
Conclusión: modelo reológico de Voellmy permite obtener distancias de propagación de la onda de rotura más consistente con la física del problema. El modelo de Bingham produce resultados más consistentes cuando el material de propagación de onda tiene una concentración volumétrica menor de 0.50. El modelo cuadrático de O'Brian y Julien, permite modelar mejor la propaación de los flujos hiperconcentrados y el flujo de barro.

### 5.3 Estudio de riesgos por la rotura del depósito de relaves en la quebrada Honda y formulación de medidas estructurales y no-estructurales de prevención y mitigación (2015)

Salida gráfica final del software DAN W - modelo reológico de Voellmy para la simulación numérica de la onda de rotura de la presa del Depósito de Relaves (Tiempo de simulación final = 300 segundos). Avance frente de onda: 1.5 km desde el pie de la presa de relaves.

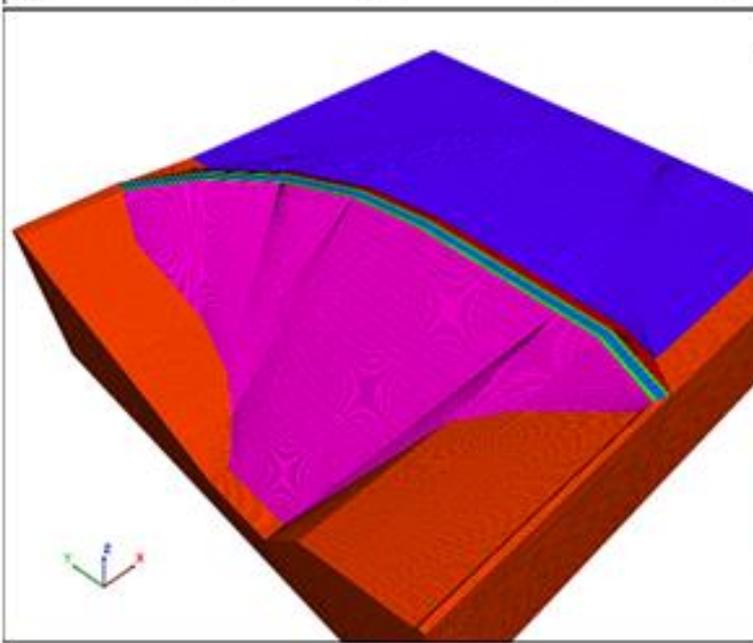
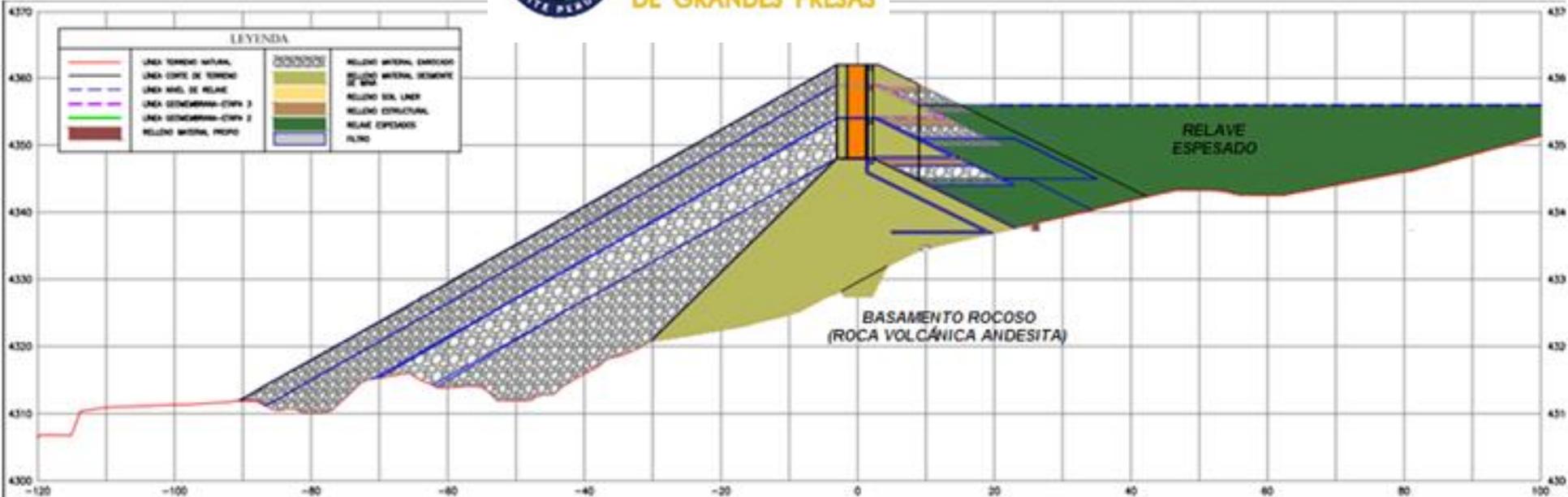


Salida gráfica DAN W - modelo reológico de Bingham para la simulación numérica de la onda de rotura de la presa del Depósito de Relaves (Tiempo de simulación final = 77 segundos). Avance frente de onda 1.5 km.



# ESTUDIO DE RIESGOS POR LA ROTURA DE LA PRESA DEL DEPOSITO DE RELAVES, Y FORMULACION DE MEDIDAS ESTRUCTURALES Y NO-ESTRUCTURALES DE PREVENCION Y MITIGACION



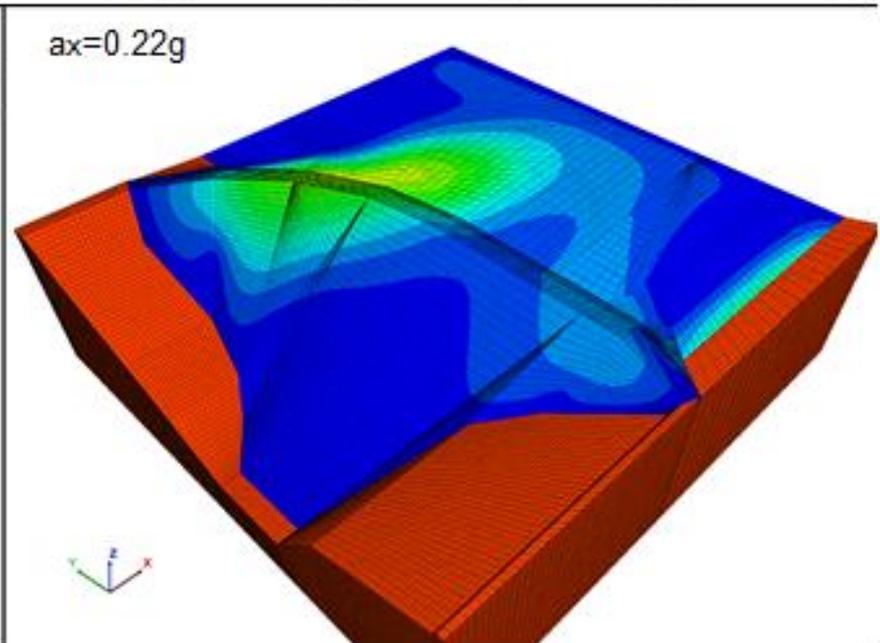


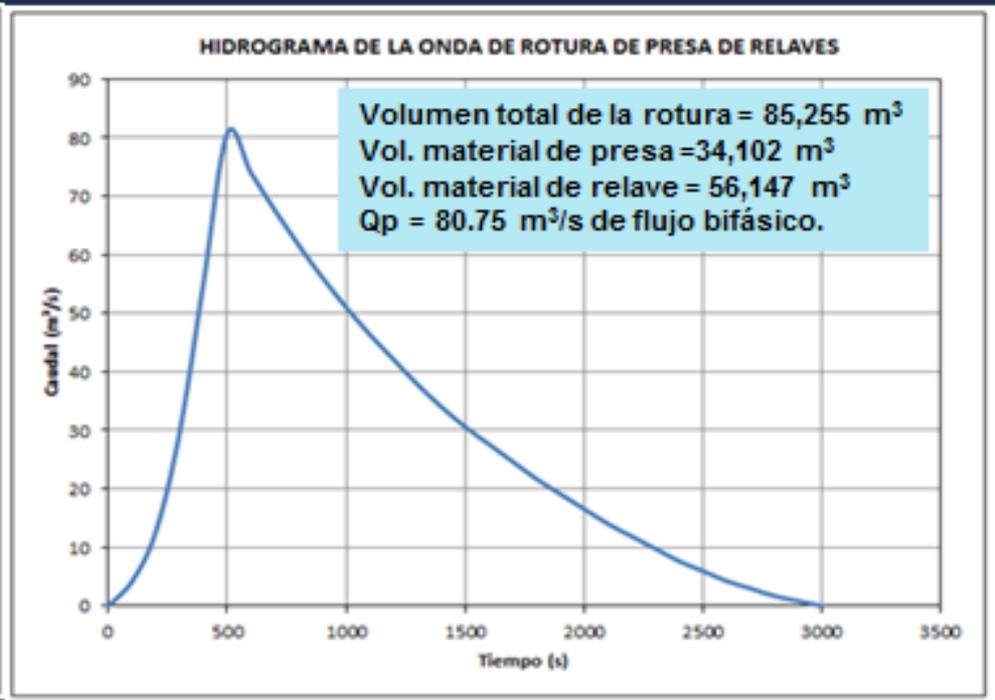
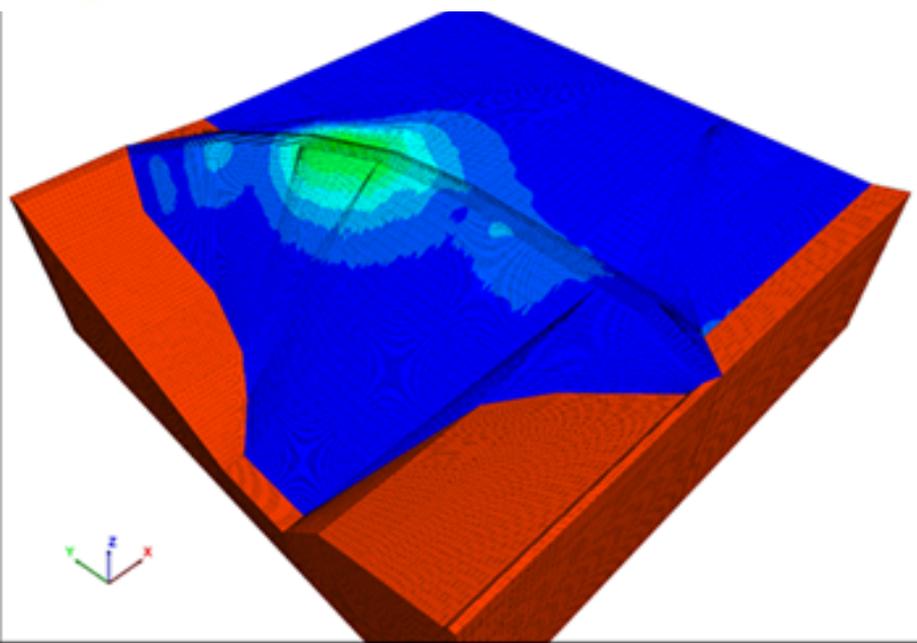
**FLAC3D 5.00**  
©2012 Itasca Consulting Group, Inc.  
Step 15000  
02/12/2016 12:29:00 p.m.

**Face**  
Colorby: Group Any  
fundacion

**Contour Of Displacement**

1.3243E+00
1.3000E+00
1.2000E+00
1.1000E+00
1.0000E+00
9.0000E-01
8.0000E-01
7.0000E-01
6.0000E-01
5.0000E-01
4.0000E-01
3.0000E-01
2.0000E-01
1.0000E-01
1.2666E-06





## TRANSITO DE LA ONDA DE ROTURA DE LA PRESA DE RELAVES

- 1) **MODELO VOELLMY** (Coeficiente de fricción=0.1 y  $\xi = 1000 \text{ m/s}^2$ ): Frente de onda del flujo alcanzó 1.8 km, con velocidad del frente de onda de 15 m/s, altura de 4 m a 6 m, y un tiempo total de 534 seg. En el tránsito de la onda de rotura del material del cuerpo de la presa y del relave, predomina la reología friccional, y en menor grado la reología de fluidos.
- 2) **MODELO BINGHAM** ( $\tau_y = 75\text{kPa}$  y  $\mu_B = 1.0 \text{ kPa}$ ): Muestra una distribución del material consistente, pero sobreestima la velocidad del flujo ( $V_m=85 \text{ m/s}$ ) y del frente de onda.
- 3) **MODELO FLO-2D**: Resulta con una distancia mayor de desplazamiento de la onda de rotura, debido principalmente al modelo reológico cuadrático utilizado, que es válido para flujos hiperconcentrados.

### 3.0 DISCUSION DE RESULTADOS

- En los dos casos analizados, se asume que la seguridad hidrológica está dada, y que la única causa de falla o rotura de presa es por acción sísmica. De hecho, en las presas y/o depósitos de relaves deshumedecidos o filtrados, es poco probable la falla por tubificación y/o licuación de suelos, y la falla por rebose de agua sobre la cresta de la presa es poco probable, por el sistema de drenajes existentes y la resistencia media a la erosión hídrica de la superficie del depósito de relaves. Se analizan escenarios de cargas sísmicas sobre el depósito de relaves y su entorno, mediante un modelo numérico tridimensional, determinando la ubicación de las zonas de máximas deformaciones en el cuerpo del depósito de relaves. El escenario más crítico de deformaciones o desplazamientos, define el volumen de material desprendido del depósito de relaves, expresado en términos de un hidrograma de la onda de rotura.
- En el caso de la presa del depósito de relaves deshumedecido, los resultados de las simulaciones numéricas indican que la zona de concentración de las máximas deformaciones se localiza en la parte central superior del cuerpo de la presa. La hipotética rotura de la presa de relaves, involucra los materiales de la abertura y un volumen determinado del depósito de relaves deshumedecidos. Su desplazamiento súbito hacia aguas abajo se producirá principalmente los efectos gravitacionales, y por la escorrentía superficial del volumen de agua acumulada en la superficie del depósito de relaves. Dado que este volumen de agua es pequeño, y considerando que el material del relave será colocado previo deshumedecimiento al 70% de concentración en peso (concentración volumétrica de 0.50), la reología de los materiales de la rotura de la presa en movimiento será principalmente friccional, y no tendrá un comportamiento de fluido.

### 3.0 DISCUSION DE RESULTADOS (continuación....)

- En el caso del depósito de relaves filtrado emplazado sobre el depósito de desmonte de mina, los resultados obtenidos con el modelo numérico tridimensional FLAC-3D, confirma que el campo de desplazamientos por la acción sísmica de  $a_y=1.5 \text{ m}^2/\text{s}$ , genera un valor máximo de 0.15 m, mucho menor de 1 m. Sin embargo, el escenario crítico (acción sísmica de  $a_y=1.75 \text{ m}^2/\text{s}$ ) produce un campo de desplazamientos mayores de 1 m, definiendo la la región o volumen desprendido del material de relave por la hipotética rotura del depósito de relaves filtrados. Este resultado es congruente con la reología del relave filtrado y las características físicas del sitio de emplazamiento del depósito de relaves filtrados. Reologicamente, en el mecanismo de rotura del depósito de relaves filtrados predomina una reología friccional.
- Se confirma que el modelo reológico de Voellmy permite obtener distancias de propagación de la onda de rotura más consistente con la física del problema. El modelo de Bingham produce resultados más consistentes cuando el material de propagación de onda tiene una concentración volumétrica menor de 0.50. El modelo cuadrático de O'Brian y Julien, permite modelar mejor la propagación de los flujos hiperconcentrados, flujo de barro, y flujos de escombros o huaycos.

## 4.0 CONCLUSIONES

- La metodología propuesta permite determinar con buena aproximación las dimensiones de la abertura de rotura, el volumen del material de la rotura de la presa de relaves o depósito de relaves filtrado, permitiendo una estimación confiable del hidrograma de rotura, el cual es el insumo principal y crítico para determinar con adecuada aproximación la extensión de la propagación de la onda de rotura, y las zonas potencialmente afectadas en aguas abajo de la presa de relaves.
- Se verifica la capacidad y potencial de los modelos numéricos tridimensionales, como el FLAC-3D, para el análisis y determinación del mecanismo de rotura de la presa y/o depósito de relaves deshumedecido o filtrado.
- Los modelos reológicos de Voellmy y Bingham permiten obtener distancias de propagación de la onda de rotura más creíbles para fines ingenieriles, tanto para presa de relaves como para el depósito de relaves filtrado. Por otro lado, el modelo cuadrático de O'Brian y Julien, permite modelar mejor la propagación de los flujos hiperconcentrados, flujo de barro, y flujos de escombros o huaycos.