

**INFORME SOBRE LA COMPROBACIÓN  
NUMÉRICA GEO-ESTRUCTURAL  
PRESA DE CHIRA**

**SEPTIEMBRE 2021**

<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2. ANTECEDENTES.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Modelación numérica de las presas de Chira y Soria (2017).....</b>	<b>7</b>
<b>3. SOFTWARE EMPLEADO EN LA MODELIZACIÓN .....</b>	<b>9</b>
<b>3.1. Tipo de elementos de cálculo .....</b>	<b>9</b>
<b>3.2. Dimensiones de los elementos.....</b>	<b>10</b>
<b>4. MODELOS NUMÉRICOS.....</b>	<b>11</b>
<b>4.1. Definición geométrica de los modelos .....</b>	<b>11</b>
4.1.1. Modelo tridimensional (M3D-Completo) .....	12
4.1.2. Modelo 3D del bloque central (M3D-Simp) .....	14
<b>5. MODELOS CONSTITUTIVOS.....</b>	<b>16</b>
<b>5.1. Modelo elástico e isótropo .....</b>	<b>16</b>
<b>5.2. Modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb.....</b>	<b>17</b>
<b>6. DEFINICIÓN DE ACCIONES Y ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN .....</b>	<b>20</b>
<b>6.1. Acciones.....</b>	<b>20</b>
6.1.1. Peso propio.....	20
6.1.2. Empuje hidráulico .....	21
6.1.3. Subpresión.....	21
6.1.4. Variación térmica .....	22
<b>6.2. Parámetros tenso-deformacionales del modelo .....</b>	<b>23</b>
<b>6.3. Estrategias de simulación .....</b>	<b>24</b>
6.3.1. Análisis tenso-deformacional y resistente .....	24
6.3.2. Aproximación al margen de seguridad resistente .....	24
6.3.3. Estudio de estabilidad general .....	26
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>27</b>
<b>7.1. Criterio de signos.....</b>	<b>27</b>
<b>7.2. Análisis tenso-deformacional y resistente .....</b>	<b>28</b>

7.2.1. Embalse vacío .....	28
7.2.2. Embalse en umbral de aliviadero (900,00 m s.n.m.) y subpresión .....	29
7.2.3. Embalse en nivel de coronación (901.00 m s.n.m.) y subpresión.....	31
<b>7.3. Aproximación al margen de seguridad resistente.....</b>	<b>33</b>
7.3.1. Escenario 1. Variación de la cohesión, fricción y tracción .....	33
7.3.2. Escenario 2. Incremento progresivo del nivel de embalse.....	34
7.3.3. Escenario 3. Rigidez relativa presa-cimiento .....	35
7.3.4. Escenario 4. Variación del coeficiente de dilatación térmica .....	36
7.3.5. Escenario 5. Resistencia a tracción minorada y subida del nivel de embalse.....	38
7.3.6. Escenario 6. Incremento de la densidad .....	38
7.3.7. Escenario 7. Reducción de subpresión .....	38
<b>7.4. Análisis de estabilidad general.....</b>	<b>39</b>
<b>8. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES REALES DE SEGURIDAD .....</b>	<b>40</b>
<b>8.1. Análisis tenso-deformacional .....</b>	<b>40</b>
8.1.1. Embalse vacío .....	40
8.1.2. Embalse en umbral de aliviadero (900 m s.n.m.) y subpresión .....	41
8.1.3. Embalse a cota (901.00 m s.n.m.) y subpresión .....	43
<b>8.2. Análisis de estabilidad general.....</b>	<b>44</b>
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>45</b>

**ÍNDICE DE FIGURAS.....Página**

Ilustración Nº 1. Geometría del modelo numérico estructural del estudio de 2017. ....	7
Ilustración Nº 2. Distribución de tensiones en el contacto de la sección principal en los modelos 3D y 2D para embalse lleno. ....	8
Ilustración Nº 3. Elemento primitivo tipo «brick» con detalle de sus nodos y caras.....	10
Ilustración Nº 4. Nube de puntos obtenida por el vuelo del dron en la presa de Chira.....	11
Ilustración Nº 5. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo.....	12
Ilustración Nº 6. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba. ....	13
Ilustración Nº 7. Vista en detalle de la planta de excavación del modelo 3D.....	13
Ilustración Nº 8. Vista en planta del modelo 3D completo.....	13

Ilustración Nº 9.	Vista en perspectiva del Modelo 3D con sus condiciones de contorno y la interfaz.	14
Ilustración Nº 10.	Vista en perspectiva del Modelo 3D con detalle de la presa.	14
Ilustración Nº 11.	Vista en perspectiva desde aguas abajo del Modelo 3D del bloque central.	15
Ilustración Nº 12.	Vista en perspectiva desde aguas arriba del Modelo 3D del bloque central.	15
Ilustración Nº 13.	Criterio de rotura de Mohr-Coulomb en FLAC3D.	18
Ilustración Nº 14.	Dominios del modelo Mohr-Coulomb utilizados en la definición de la regla de flujo	19
Ilustración Nº 15.	Ley de subpresiones. Caso estático, sin pantalla de drenaje. Sin grieta bajo del pie de aguas arriba.	21
Ilustración Nº 16.	Evolución anual de las temperaturas y niveles en el embalse de Chira.	23
Ilustración Nº 17.	Criterio de signos para esfuerzos positivos.	27
Ilustración Nº 18.	Embalse vacío. Tensiones Principales máximas.	28
Ilustración Nº 19.	Embalse vacío. Tensiones Principales mínimas.	29
Ilustración Nº 20.	Embalse Vacío. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.	29
Ilustración Nº 21.	Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.	30
Ilustración Nº 22.	Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.	30
Ilustración Nº 23.	Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos radiales.	30
Ilustración Nº 24.	Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.	30
Ilustración Nº 25.	Embalse a umbral del aliviadero. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.	31
Ilustración Nº 26.	Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.	32
Ilustración Nº 27.	Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas.	32
Ilustración Nº 28.	Embalse a cota de coronación. Desplazamientos radiales.	32
Ilustración Nº 29.	Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento.	32

Ilustración Nº 30.	Embalse a cota de coronación. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento. ....	33
Ilustración Nº 31.	Resultados Escenario 1.....	34
Ilustración Nº 32.	Resultados Escenario 2.....	35
Ilustración Nº 33.	Distribución tensional en la base de la presa para el Escenario 3. ....	36
Ilustración Nº 34.	Resultados Escenario 4.....	37
Ilustración Nº 35.	Resultados Escenario 6.....	38
Ilustración Nº 36.	Resultados Escenario 7.....	39
Ilustración Nº 37.	Embalse vacío. Tensiones Principales máximas.....	40
Ilustración Nº 38.	Embalse vacío. Tensiones Principales mínimas. ....	41
Ilustración Nº 39.	Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.....	41
Ilustración Nº 40.	Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.....	42
Ilustración Nº 41.	Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos radiales.....	42
Ilustración Nº 42.	Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.....	42
Ilustración Nº 43.	Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.....	43
Ilustración Nº 44.	Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas. ....	43
Ilustración Nº 45.	Embalse a cota de coronación. Desplazamientos radiales.....	43
Ilustración Nº 46.	Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento. ....	44
Ilustración Nº 47.	Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento. ....	44

## **ÍNDICE DE TABLAS**

## **PÁGINA**

Tabla Nº 1.	Propiedades materiales empleadas en el modelo estructural de 2017. ....	7
Tabla Nº 2.	Nivel de embalse, temperatura ambiente e incremento por radiación solar para el emplazamiento de la presa de Chira.....	22
Tabla Nº 3.	Parámetros resistentes y tenso-deformacionales empleados en el modelo de la presa de Chira. ....	24

Tabla Nº 4.	Efecto de la relación $E_c/E_m$ en el comportamiento de presas de gravedad según Rocha (Extraído de Romana).....	25
Tabla Nº 5.	Criterio de signos para tensiones principales.....	27
Tabla Nº 6.	Embalse Vacío. Resumen de los resultados.....	29
Tabla Nº 7.	Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados. ....	31
Tabla Nº 8.	Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados. ....	33
Tabla Nº 9.	Casos planteados para el Escenario 1.....	33
Tabla Nº 10.	Casos planteados para el Escenario 2.....	34
Tabla Nº 11.	Casos planteados para el Escenario 3.....	35
Tabla Nº 12.	Escenario 3. Resumen de resultados (I/II).....	35
Tabla Nº 13.	Escenario 3. Resumen de resultados (II/II).....	36
Tabla Nº 14.	Casos planteados para el Escenario 4.....	36
Tabla Nº 15.	Coefficientes de seguridad frente a la estabilidad general. ....	39
Tabla Nº 16.	Parámetros resistentes y tenso-deformacionales representativos de la presa de Chira. ....	40
Tabla Nº 17.	Embalse Vacío. Resumen de los resultados.....	41
Tabla Nº 18.	Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados. ....	42
Tabla Nº 19.	Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados. ....	44
Tabla Nº 20.	Coefficientes de seguridad frente a la estabilidad general. ....	44

## 1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este documento es la actualización del modelo de comportamiento tenso-deformacional de la presa de Chira (Gran Canaria) realizado en 2017.

El trabajo ha consistido en una serie de simulaciones numéricas empleando como software de cálculo FLAC3D para la determinación de tensiones y desplazamientos bajo distintos escenarios de sollicitación, así como determinar las condiciones resistentes y de estabilidad de la presa.

El documento se ha estructurado de la siguiente forma:

- En primer lugar, se describen los antecedentes a los cálculos realizados con motivo de este proyecto.
- A continuación, se describen las características del software empleado, las modelaciones realizadas, los modelos constitutivos de las estructuras, así como las acciones y estrategias de simulación.
- Se analiza la respuesta estructural de la presa bajo distintos rangos de parámetros tanto del cuerpo de presa como de su cimentación.
- Finalmente, y con el resultado de la campaña geotécnica, se evalúan, mediante modelo numérico, las condiciones reales de seguridad estructural de la presa.

Así, la estructuración del presente documento responde a un ordenamiento cronológico de las actividades. No obstante, en conjunto, es posible analizar las condiciones de seguridad geoes estructural de la presa desde una doble perspectiva:

- Mediante el análisis del comportamiento estructural de la presa por modelo numérico y a partir de la aproximación por parte del proyectista de los parámetros geo - mecánicos del cuerpo de presa y su cimiento una vez finalizada la campaña geotécnica (Apartado 8).
- Mediante el análisis del comportamiento estructural de la presa por modelo numérico y a partir de un amplio rango de parámetros geo - mecánicos del cuerpo de presa y su cimiento que cubriría la incertidumbre residual remanente tras la finalización de la campaña geotécnica y que es inherente a toda estructura existente (Apartado 6 y 7).

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1. MODELACIÓN NUMÉRICA DE LAS PRESAS DE CHIRA Y SORIA (2017)

En este estudio se modelizó la geometría a partir de la geometría del estudio de 2016, tal y como se muestra en la Ilustración N° 1. En la Tabla N° 1 se resumen las propiedades materiales empleadas, si bien en el propio informe se hace hincapié sobre la incertidumbre en dicha estimación.

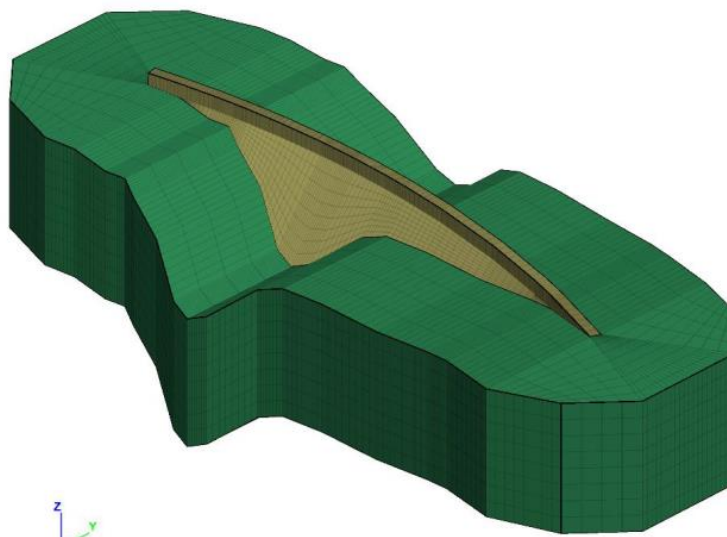


Ilustración N° 1. Geometría del modelo numérico estructural del estudio de 2017.

	Módulo de Elasticidad [GPa]	Módulo de Poisson	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>CUERPO DE PRESA</b>	2.5	0.28	2000
<b>TERRENO</b>	12.0	0.15	2100

Tabla N° 1. Propiedades materiales empleadas en el modelo estructural de 2017.

Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

- «Las tensiones, tanto de compresión como de tracción, son compatibles con márgenes de seguridad razonables».
- «La estabilidad al deslizamiento del cuerpo de presa, parece ser satisfecha con una estimación conservadora de los parámetros resistentes...».
- «La forma en planta de la presa, [...] favorece un efecto de confinamiento que favorece la estabilidad general al deslizamiento».

Este efecto de confinamiento se puede observar en la distribución de tensiones en el contacto de la sección principal con embalse lleno que se muestra en la Ilustración N° 2.

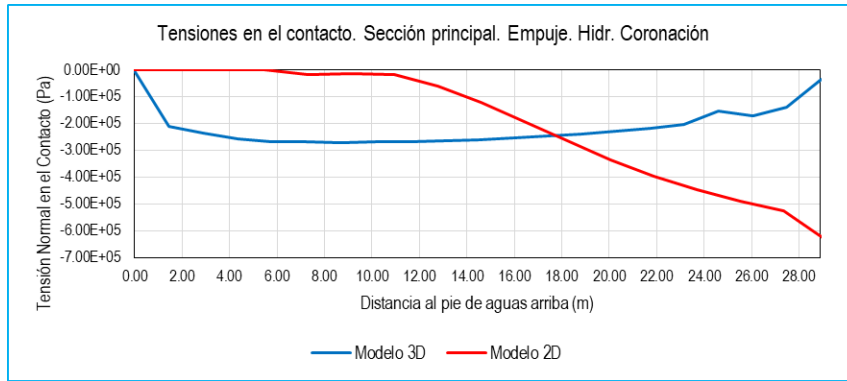


Ilustración N° 2. Distribución de tensiones en el contacto de la sección principal en los modelos 3D y 2D para embalse lleno.

### 3. SOFTWARE EMPLEADO EN LA MODELIZACIÓN

El software empleado para la realización de los trabajos es FLAC 3D en su versión 6.0. FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) es un programa de cálculo numérico tridimensional especialmente concebido para analizar problemas geotécnicos, geológicos y mineros. El programa se basa en el método explícito de las diferencias finitas. El software permite tener en cuenta cualquier geometría a través de elementos de forma arbitraria, con condiciones de contorno más o menos generales y permite analizar problemas estáticos y dinámicos fuertemente no lineales en pequeñas o grandes deformaciones, ya sea en suelo o en roca y teniendo en cuenta o no (según el caso) el acoplamiento hidromecánico y la interacción suelo-estructura. Incorpora una gran variedad de modelos constitutivos elásticos, plásticos y elasto-viscoplásticos, así como elementos lineales y superficiales especialmente concebidos para modelizar vigas, pilotes, anclajes, bulones y placas. Así mismo, permite considerar planos de deslizamiento y la interacción suelo-estructura por medio de elementos de tipo "interface".

Las principales ventajas que presenta este software respecto a otros softwares de cálculo numérico, son las siguientes:

- Resulta mucho más apropiado para modelizar problemas y sistemas donde se produzcan grandes plastificaciones, importantes fenómenos de fluencia plástica, situaciones de colapso (inestabilidad física) y grandes desplazamientos, deformaciones y rotaciones.
- Resulta más adecuado para analizar problemas caracterizados por una no linealidad física y/o material que la mayoría de softwares de elementos finitos.
- Puede considerar cualquier modelo constitutivo sin ningún cambio en el algoritmo de resolución, por el contrario, muchos otros softwares de elementos finitos precisan de algoritmos o técnicas de resolución distintas para cada uno de los modelos constitutivos.
- Basado en un método explícito, no precisa de una importante cantidad de memoria RAM al no tener que almacenar ni construir ninguna matriz de rigidez ni invertirla. El hecho de no tener que almacenar ni construir una matriz de rigidez hace que FLAC3D sea más eficiente a la hora de analizar problemas en grandes deformaciones.

Por otro lado, la principal desventaja que presenta es que los tiempos de cálculo son mucho más largos en FLAC3D que en otros softwares de elementos finitos para problemas lineales o en modelos de comportamiento estable.

#### 3.1. TIPO DE ELEMENTOS DE CÁLCULO

Los elementos de cálculo empleados son sólidos tridimensionales isoparamétricos de 6 caras, con nudos en los vértices que incluye FLAC 3D de forma predefinida (Ilustración N° 3), los cuales son llamados «brick». Además, con el objetivo de ajustarse mejor a la geometría real de la presa, se emplean los elementos que aparecen como transformación de estos elementos, en los cuales se agrupan nudos para formar otras formas como tetraedros, cuñas y pirámides.

En la Ilustración N° 3, se muestra el elemento tipo «brick» con detalle de la numeración de sus nudos y sus caras.

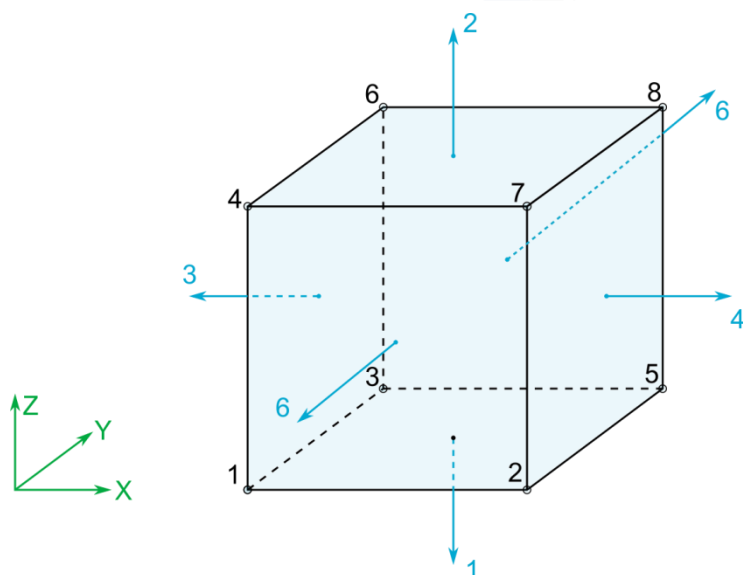


Ilustración Nº 3. Elemento primitivo tipo «brick» con detalle de sus nodos y caras.

### 3.2. DIMENSIONES DE LOS ELEMENTOS

Las dimensiones de los elementos no han sido fijas, sino que han ido variando para ajustarse correctamente a la geometría de cada una de las zonas de la presa y el terreno. Para la presa se ha empleado un tamaño medio de 1.5 metros y para el terreno el tamaño de malla promedio se extiende hasta un valor máximo de 10 metros en los contornos.

## 4. MODELOS NUMÉRICOS

### 4.1. DEFINICIÓN GEOMÉTRICA DE LOS MODELOS

La definición geométrica de los modelos se ha realizado partiendo del levantamiento fotogramétrico realizado mediante un vuelo con dron. De este vuelo se obtiene una nube de puntos, tanto de la presa como del terreno circundante, que reproduce fielmente la geometría real de la presa y sus obras anejas. En la Ilustración N° 4, se muestra una vista cenital y una perspectiva de la nube de puntos empleada como base.



Ilustración N° 4. Nube de puntos obtenida por el vuelo del dron en la presa de Chira.

Con esta información se ha definido la geometría de los modelos de cálculo, empleando las secciones obtenidas de la nube de puntos para la parte visible de la presa y la información sobre la cimentación recopilada en los planos de proyecto e interferida de los distintos reconocimientos geotécnicos para la definición de la parte subterránea de la presa.

Con esta definición geométrica se han definido 2 geometrías tridimensionales, una que contempla la presa completa y otra que incluye únicamente la zona central del valle.

#### 4.1.1. Modelo tridimensional (M3D-Completo)

En este modelo se modeliza de forma tridimensional la presa completa, así como el terreno circundante. El terreno circundante se ha modelizado a partir de las curvas de nivel obtenidas del vuelo LiDAR, el cual se ha supuesto perfectamente empotrado en su contorno.

La interacción terreno-estructura se ha realizado a través de una interfaz, este elemento permite estudiar la estabilidad de la estructura bajo este plano de deslizamiento además de obtener, de forma sencilla, las tensiones transmitidas de la presa al terreno.

Respecto a las condiciones de contorno, el modelo de diferencias finitas consta de 68 636 elementos y 42 349 nodos, con tres grados de libertad cada nodo: desplazamientos en las direcciones X, Y y Z. A continuación, se muestra en detalle la geometría del modelo según se indica:

- Ilustración N° 5. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo.
- Ilustración N° 6. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba.
- Ilustración N° 7. Vista en detalle de la planta de excavación del modelo 3D.
- Ilustración N° 8. Vista en planta del modelo 3D completo.
- Ilustración N° 9. Vista en perspectiva del Modelo 3D con sus condiciones de contorno y la interfaz.
- Ilustración N° 10. Vista en perspectiva del Modelo 3D con detalle de la presa.

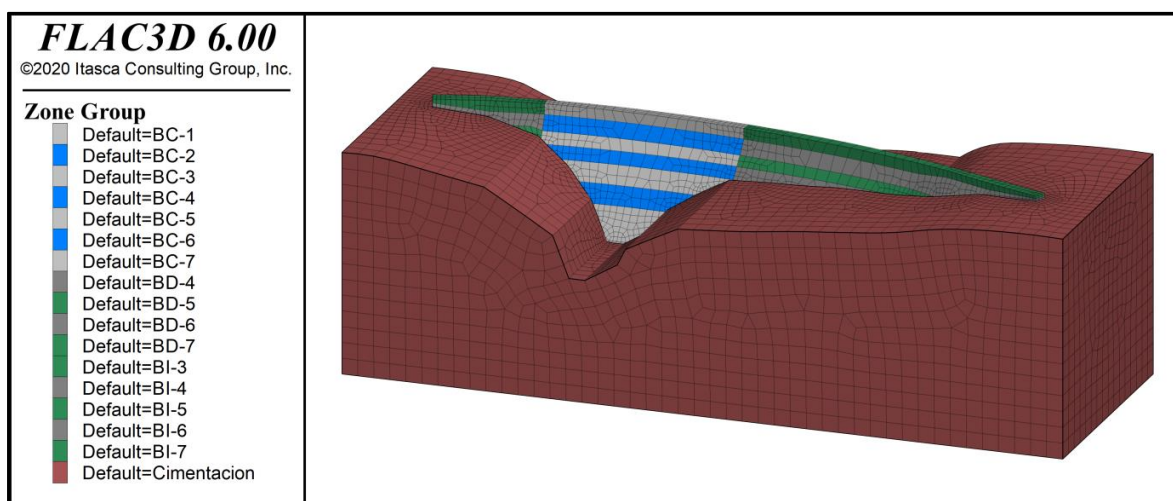


Ilustración N° 5. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo.

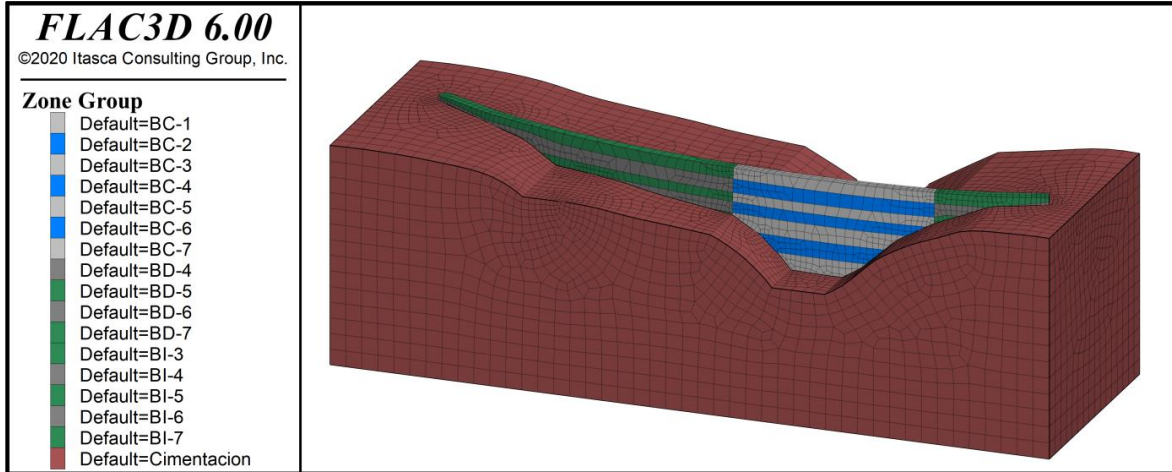


Ilustración N° 6. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba.

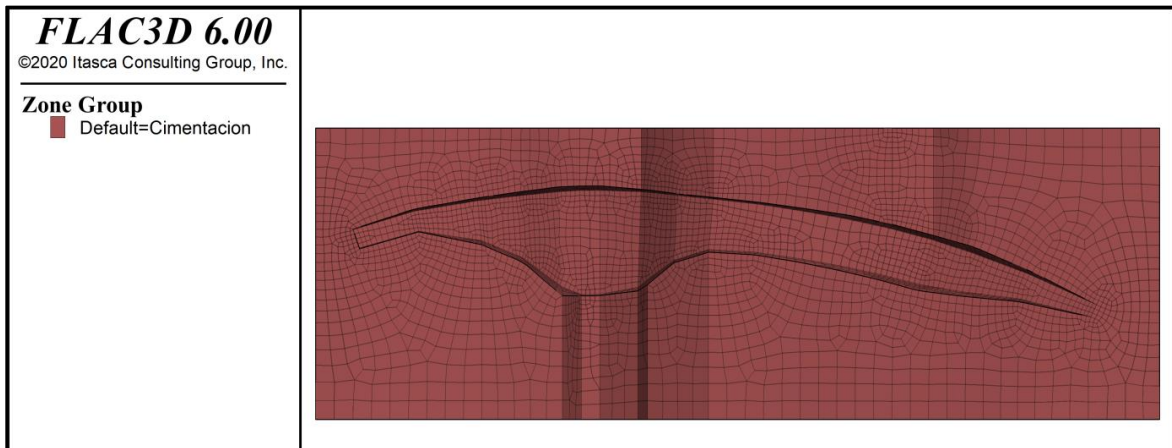


Ilustración N° 7. Vista en detalle de la planta de excavación del modelo 3D.

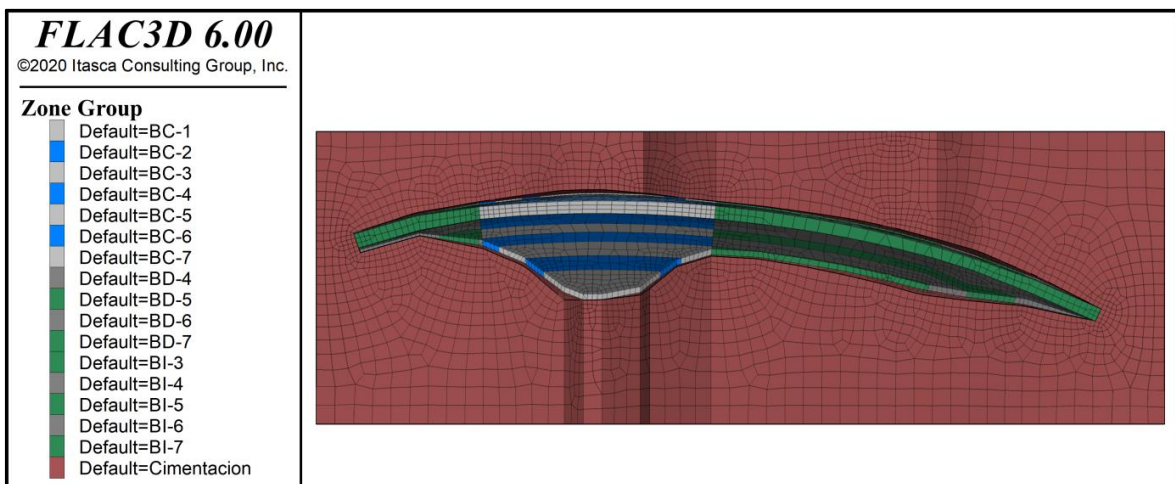


Ilustración N° 8. Vista en planta del modelo 3D completo.

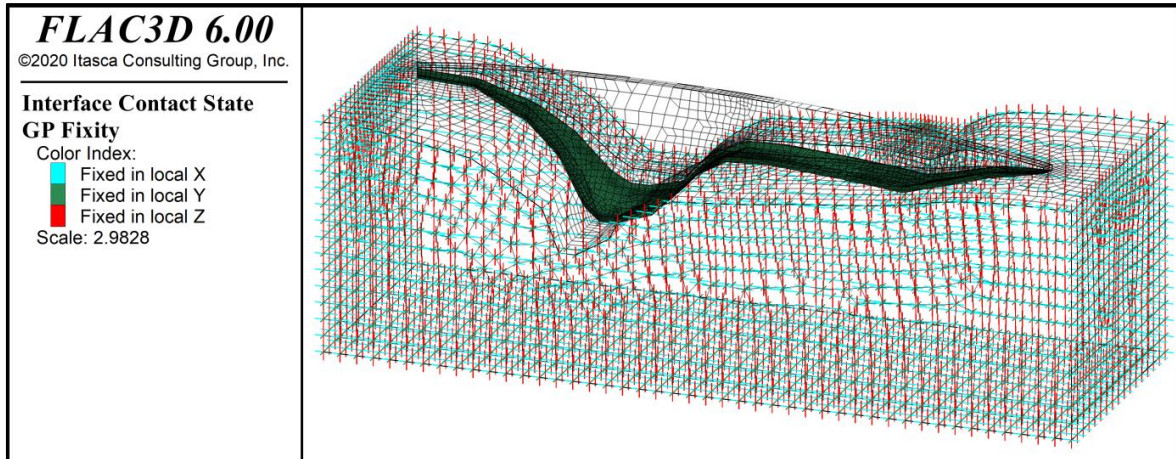


Ilustración N° 9. Vista en perspectiva del Modelo 3D con sus condiciones de contorno y la interfaz.

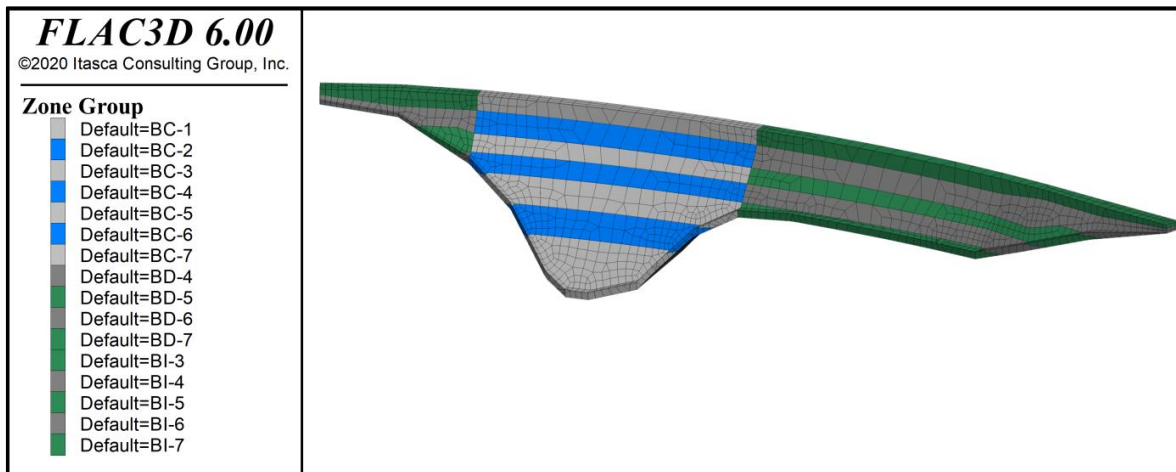


Ilustración N° 10. Vista en perspectiva del Modelo 3D con detalle de la presa.

#### 4.1.2. Modelo 3D del bloque central (M3D-Simp)

Debido al notable cambio de rigidez entre la zona central de la presa y las zonas laterales a causa de la variación de altura de las secciones, se prevé que se produzca una concentración tensional por esta zona. Por ello, se ha decidido realizar un modelo tridimensional de la zona central del valle de mayor altura, para estudiar su comportamiento aislado del resto de la presa, por si dicha concentración de tensiones fuera suficiente para agotar su resistencia.

Este modelo consiste en un modelo tridimensional de la zona central del valle y de su interacción con el terreno. Para ello, se ha incluido una porción del terreno, modelada a través de las curvas de nivel obtenidas del vuelo LiDAR, el cual se ha supuesto perfectamente empotrado en su contorno.

La interacción terreno-estructura se ha realizado a través de una interfaz, este elemento permite estudiar la estabilidad de la estructura bajo este plano de deslizamiento además de obtener, de forma sencilla, las tensiones transmitidas de la presa al terreno.

Respecto a las condiciones de contorno, el modelo de diferencias finitas consta de 68 636 elementos y 41 557 nodos, con tres grados de libertad cada nodo: desplazamientos en las direcciones X, Y y Z. A continuación, se muestra en detalle la geometría del modelo según se indica:

- Ilustración N° 11. Vista en perspectiva desde aguas abajo del Modelo 3D del bloque central.
- Ilustración N° 12. Vista en perspectiva desde aguas arriba del Modelo 3D del bloque central.

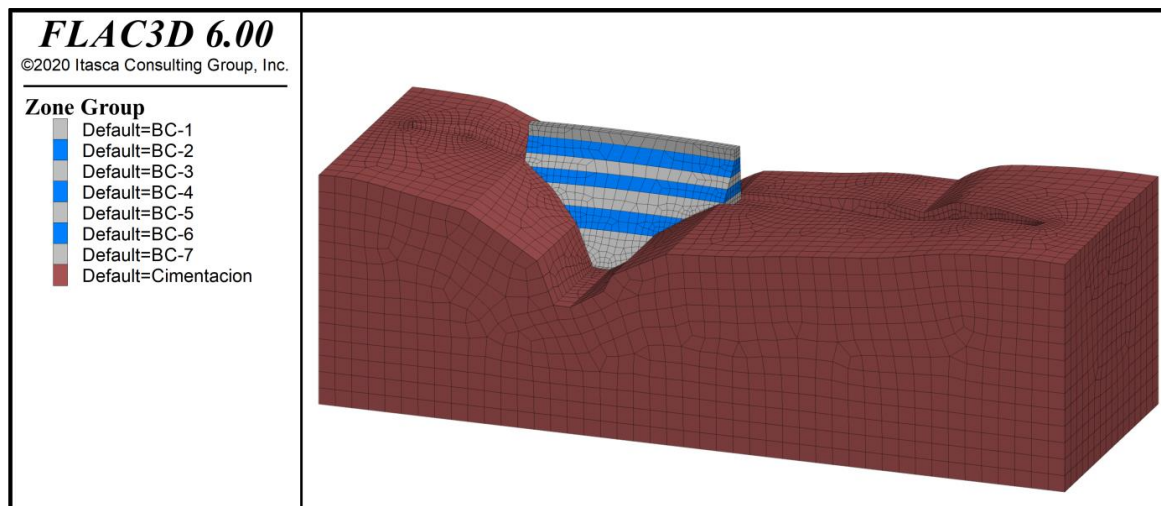


Ilustración N° 11. Vista en perspectiva desde aguas abajo del Modelo 3D del bloque central.

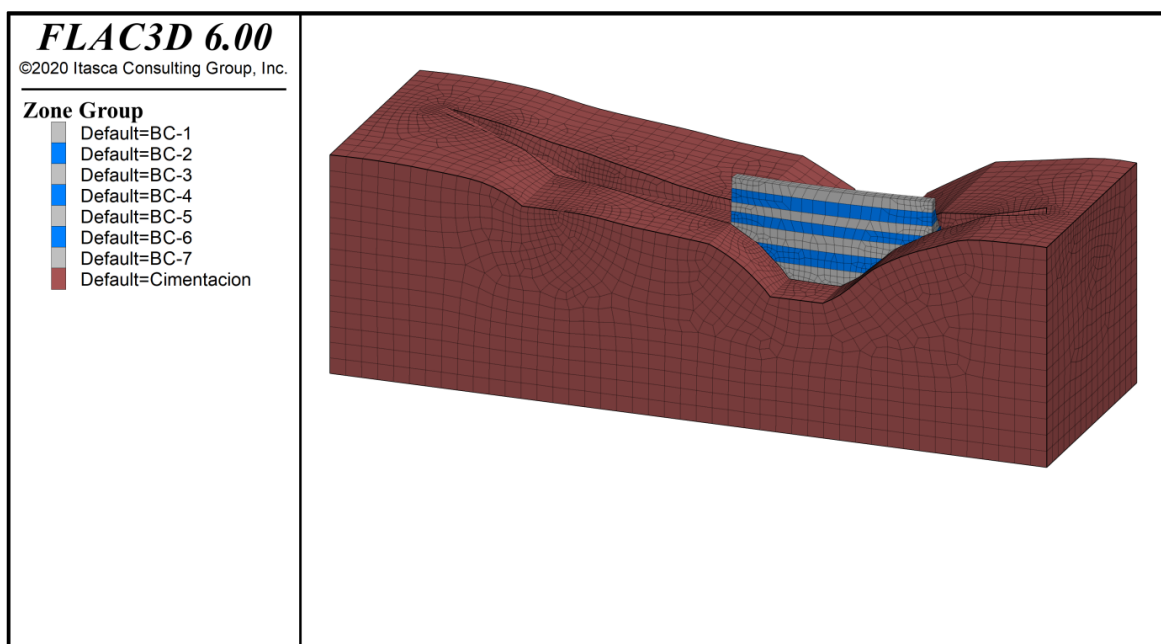


Ilustración N° 12. Vista en perspectiva desde aguas arriba del Modelo 3D del bloque central.

## 5. MODELOS CONSTITUTIVOS

La presa a estudiar es una presa de fábrica sobre cimentación rocosa, por ello lo más adecuado es el empleo de modelos elasto-plásticos. En este caso en particular, se ha decidido emplear un modelo elástico y lineal para la modelización de la cimentación de la presa y un modelo con criterio de plastificación de Mohr-Coulomb para el cuerpo de presa, pues se considera adecuado para reproducir el comportamiento de presas de fábrica, además de ser uno de los modelos constitutivos más empleados y la posibilidad de inferir sus parámetros a través de ensayos y reconocimientos superficiales junto con abundante literatura técnica. Para el caso en el que se requiera un cálculo de coeficientes de seguridad para el análisis de deslizamiento, tanto el terreno como en la presa se emplea un modelo con criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

Igualmente, el plano de contacto entre la presa y el terreno, se ha modelizado mediante un elemento interfaz el cual se modeliza aplicando el criterio de rotura de Mohr-Coulomb.

Dado que la presa no dispone de juntas verticales, se han realizado modelos térmicos transitorios, reproduciendo un año tipo y estudiando la respuesta tenso-deformacional de la presa. Para ello, se emplean modelos de conducción y convección acoplados al modelo mecánico, y se realiza tanto una simulación del nivel del embalse como de la sollicitación térmica en el emplazamiento de la presa siguiéndose la metodología propuesta en «Estimación de la sollicitación térmica medioambiental en el cálculo de presas a partir de información climática regional»<sup>1</sup> debido a la falta de registros de temperaturas del agua y de la atmosfera de forma local en la presa.

### 5.1. MODELO ELÁSTICO E ISÓTROPO

El modelo elástico e isótropo está basado en la ley de Hooke, en el cual los incrementos de tensión se llevan a cabo de forma lineal:

$$\Delta\sigma_{ij} = 2G\Delta\epsilon_{ij} + \alpha_2\Delta\epsilon_{kk}\delta_{ij} \quad (1)$$

donde se aplica la convención de suma de Einstein,  $\delta_{ij}$  es el símbolo del delta de Kroenecker, y  $\alpha_2$  es una constante del material relacionada con el módulo de compresibilidad,  $K$  y el módulo de corte,  $G$ , como:

$$\alpha_2 = K - \frac{2}{3}G \quad (2)$$

De esta forma, se obtienen nuevos valores de tensión a partir de la relación:

$$\sigma_{ij}^N = \sigma_{ij} + \Delta\sigma_{ij} \quad (3)$$

Este modelo requiere como parámetros de entrada el módulo de compresibilidad,  $K$ , y el módulo de corte,  $G$ . Estos valores están relacionados con las propiedades elásticas del módulo de Young,  $E$ , y el coeficiente de Poisson,  $\nu$ , mediante las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Cervera-Miquel, D., Escuder-Bueno, I., 2018. Estimación de la sollicitación térmica medioambiental en el cálculo de presas a partir de información climática regional. XI Jornadas Españolas de Presas.

## 5.2. MODELO ELASTO-PLÁSTICO DE MOHR-COULOMB

Este modelo incorpora un criterio de plastificación a la respuesta general elástica, alcanzando el cual las deformaciones dejan de ser recuperables. La envolvente de fallo para este modelo corresponde a un criterio de Mohr-Coulomb con corte de tensión. La posición de un punto de tensión en esta envolvente está controlada por una regla de flujo no asociada para el fallo por cortante, y una regla asociada para el fallo por tracción. Este modelo, por tanto, queda gobernado por la cohesión y el ángulo de fricción interna del material.

El criterio de Mohr-Coulomb en FLAC3D se expresa en términos de las principales tensiones  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  y  $\sigma_3$ , que son los tres componentes del vector de tensiones generalizado para este modelo ( $n = 3$ ). Los componentes del vector de deformación generalizado correspondiente son las cepas principales  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  y  $\epsilon_3$

La expresión incremental de la ley de Hooke en términos del tensor generalizado y los incrementos de tensión tiene la forma:

$$\begin{aligned}\Delta\sigma_1 &= \alpha_1\Delta\epsilon_1^e + \alpha_2(\Delta\epsilon_2^e + \Delta\epsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_2 &= \alpha_1\Delta\epsilon_2^e + \alpha_2(\Delta\epsilon_1^e + \Delta\epsilon_3^e) \\ \Delta\sigma_3 &= \alpha_1\Delta\epsilon_3^e + \alpha_2(\Delta\epsilon_1^e + \Delta\epsilon_2^e)\end{aligned}\quad (5)$$

donde  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son constantes de material definidas en términos del módulo de corte,  $G$  y el módulo de compresibilidad,  $K$ , como:

$$\begin{aligned}\alpha_1 &= K + \frac{4}{3}G \\ \alpha_2 &= K - \frac{2}{3}G\end{aligned}\quad (6)$$

El criterio de fallo utilizado en el modelo *FLAC3D* es un criterio compuesto de Mohr-Coulomb con límite de tensión. Al etiquetar las tres principales tensiones para que

$$\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_3 \quad (7)$$

este criterio se puede representar en el plano  $(\sigma_1, \sigma_3)$  como se observa en la Ilustración N° 3. La envolvente de fallo  $f(\sigma_1, \sigma_3) = 0$  se define de los puntos A y B por el criterio de falla de Mohr-Coulomb  $f^s = 0$  con

$$f^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\phi - 2c \sqrt{N_\phi} \quad (8)$$

y de B a C por un criterio de falla de tensión de la forma  $f^t = 0$  con

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (9)$$

donde  $\phi$  es el ángulo de fricción,  $c$  es la cohesión,  $\sigma^t$  es la resistencia a la tracción, y

$$N_\phi = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (10)$$

La resistencia a la tracción del material no puede exceder el valor de  $\sigma_3$  correspondiente al punto de intersección de las líneas rectas  $f^s = 0$  y  $\sigma_1 = \sigma_3$  en el plano  $f(\sigma_1, \sigma_3)$ . Este valor máximo está dado por

$$\sigma^t = \frac{c}{\tan \phi} \quad (11)$$

La función potencial se describe por medio de dos funciones,  $g^s$  y  $g^t$ , que se utilizan para definir el flujo plástico de corte y el flujo de plástico a tracción, respectivamente. La función  $g^s$  corresponde a una ley no asociada y tiene la forma

$$g^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\psi \quad (12)$$

donde  $\psi$  es el ángulo de dilatación y

$$N_\psi = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \quad (13)$$

La función  $g^t$  corresponde a una regla de flujo asociada y está escrita

$$g^t = f^t = \sigma_3 - \sigma^t \quad (14)$$

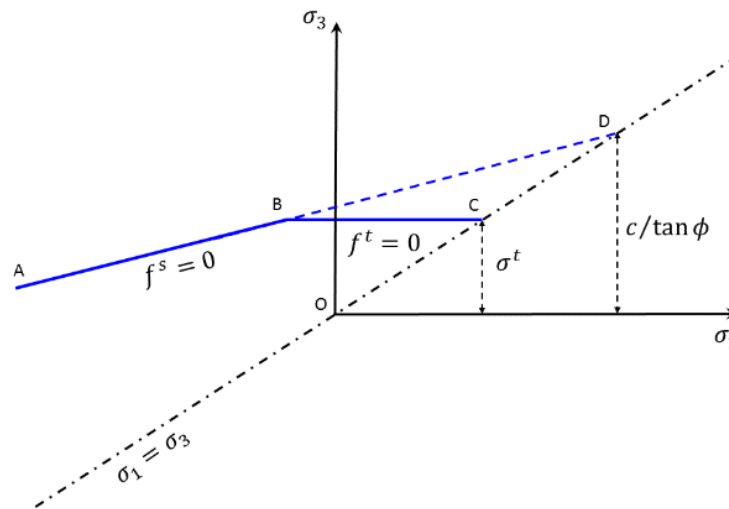


Ilustración N° 13. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb en FLAC3D<sup>2</sup>.

La regla de flujo recibe una definición única mediante la aplicación de la siguiente técnica. Una línea representada por la diagonal entre la representación de  $f^s = 0$  y  $f^t = 0$  en el plano  $(\sigma_1, \sigma_3)$  (Ilustración N° 14) divide el dominio donde una suposición elástica violando la función de rendimiento compuesta en dos dominios: dominio 1 y dominio 2 como se muestra en la Ilustración N° 14.

Si el punto de tensión cae dentro del dominio 1, se produce el fallo por cortante y el punto de tensión se coloca en la curva  $f^s = 0$  usando una regla de flujo derivada usando la función potencial  $g^s$ . Si el punto cae dentro del dominio 2, se produce un fallo por tracción, y el nuevo punto de tensión se ajusta a  $f^t = 0$  usando una regla de flujo derivada usando  $g^t$ .

<sup>2</sup> ITASCA CONSULTING (2017). Manual de FLAC3D.

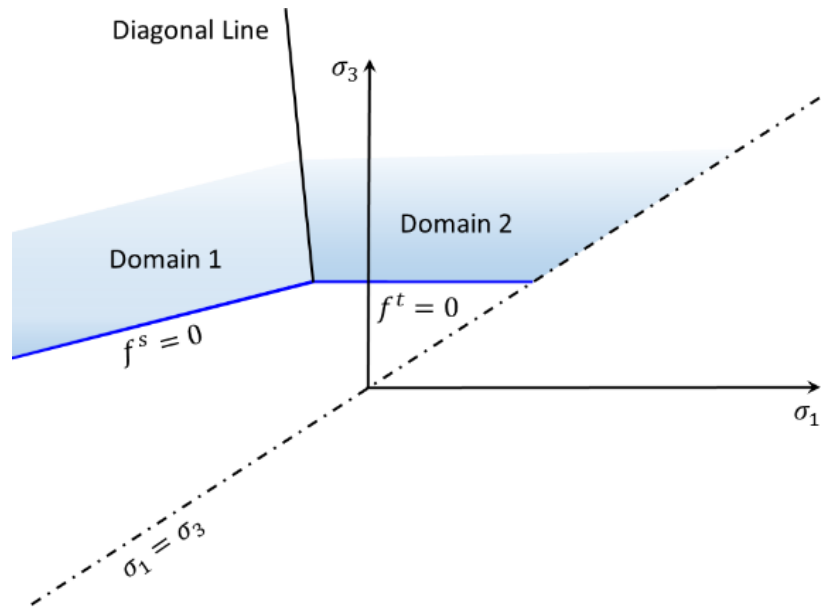


Ilustración N° 14. Dominios del modelo Mohr-Coulomb utilizados en la definición de la regla de flujo<sup>3</sup>

<sup>3</sup> TASCA CONSULTING (2017). Manual de FLAC3D.

## 6. DEFINICIÓN DE ACCIONES Y ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN

Las solicitaciones consideradas en el análisis de una gran presa vienen establecidas en el Artículo 11 de la Norma técnica de seguridad para el proyecto, construcción y puesta en carga de presas y llenado de embalses<sup>4</sup>. Las acciones que indica el citado artículo son las siguientes:

- Peso propio.
- Empuje hidrostático.
- Presiones intersticiales en el cuerpo de presa y en el cimiento.
- Efectos térmicos.
- Empuje de los sedimentos.
- Efecto del oleaje.
- Efectos sísmicos.
- Empuje del hielo.
- Y las particulares que procedan en cada caso.

No obstante, se indica que se deben tener en cuenta las solicitaciones que tengan cierta probabilidad de presentarse, y resulten significativas por su influencia en el comportamiento de la presa, por lo que las acciones que finalmente se consideran son:

- Peso propio.
- Empuje hidrostático.
- Presiones intersticiales en el cuerpo de presa y en el cimiento.
- Efectos térmicos.

Destacar que los efectos sísmicos no son considerados siguiendo lo indicado en el Artículo 13 de la Norma técnica de seguridad para el proyecto, construcción y puesta en carga de presas y llenado de embalses dado que considerando una aceleración sísmica básica de 0.04g (Norma de Construcción Sismorresistente – NCSE-02), no se requiere de cálculo sísmico independientemente de la categoría de la presa.

### 6.1. ACCIONES

#### 6.1.1. **Peso propio**

El peso de la presa viene determinado por la densidad del material que conforma la presa y su volumen empleado. El volumen viene determinado por la geometría, la cual se introduce detalladamente al modelo.

Se adopta una densidad para el cuerpo de presa de 2100 kg/m<sup>3</sup> como valor conservador tomado de los Informes de Vigilancia de presas.

---

<sup>4</sup> Real Decreto 264/2021, de 13 de abril, por el que se aprueban las Normas Técnicas de Seguridad para las Presas y sus Embalses. Anexo II. Norma técnica de seguridad para el proyecto, construcción y puesta en carga de presas y llenado de embalses

### 6.1.2. Empuje hidráulico

El empuje hidrostático se considera como una presión o fuerza de superficie normal al paramento,  $p_w$ , cuyo valor se obtiene mediante:

$$p_w = \gamma_w h \quad (15)$$

donde:

- $\gamma_w$ : peso específico del agua.
- $h$ : profundidad desde la superficie del agua al punto de cálculo.

El empuje total se calcula integrando estas presiones a lo largo del paramento en contacto con el agua.

El peso específico adoptado para el agua es de  $\gamma_w = 9810 \text{ N/m}^3$  dado que se trata de una presa de regulación de agua y se supone que el contenido de materiales disueltos no es significativo.

### 6.1.3. Subpresión

La subpresión, debido al tipo de modelos considerados, es necesario incorporarla al modelo como una acción actuante sobre la presa. Es necesario, por tanto, conocer el valor de la subpresión en el plano de contacto entre presa y cimiento. La ley de subpresiones en el contacto presa-cimiento se determina en base a la propuesta del USACE<sup>5</sup>, sobre las cuales se basa también las recomendaciones nacionales de la GT-2<sup>6</sup>.

En el caso particular de esta presa, se trata de una situación sin pantalla de drenaje y sin existencia de zona agrietada bajo el pie de aguas arriba. La ley de subpresiones es lineal, variando desde un valor en el pie de aguas arriba ( $H_1$ ) igual al nivel en el embalse hasta un valor en el pie de aguas abajo ( $H_2$ ) igual al nivel en ese punto, tal y como se recoge en la Ilustración N° 15.

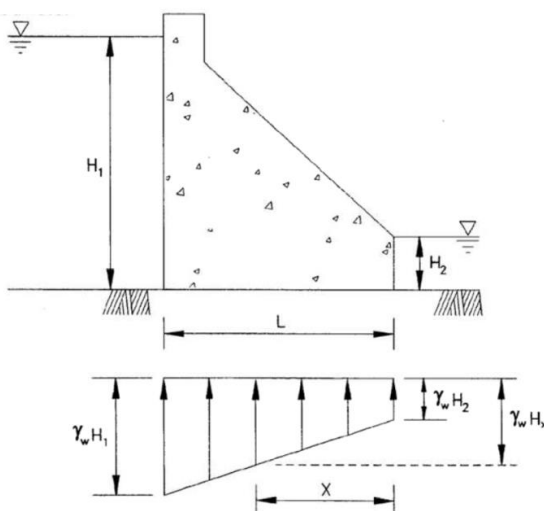


Ilustración N° 15. Ley de subpresiones. Caso estático, sin pantalla de drenaje. Sin grieta bajo del pie de aguas arriba.

<sup>5</sup> US ARMY CORPS OF ENGINEERS (2000). Evaluation and Comparison of Stability Analysis and Uplift Criteria for Concrete Gravity Dams by Three Federal Agencies.

<sup>6</sup> COMITÉ NACIONAL ESPAÑOL DE GRANDES PRESAS (2003). Guías Técnicas de Seguridad de Presas No 2. Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas.

Quedando definido geoméricamente todos los parámetros, únicamente queda establecer el valor de  $H_1$  y  $H_2$ :

- Subpresión bajo el pie de aguas arriba ( $H_1$ ): La subpresión bajo el pie de aguas arriba ( $H_1$ ) es habitual que se considere bajo la hipótesis de que corresponde con la altura de agua en el embalse, con la limitación en este caso del nivel N.M.N.
- Subpresión bajo el pie de aguas abajo ( $H_2$ ): De igual modo que en el caso del pie de aguas arriba, es habitual suponer que subpresión bajo el pie de aguas abajo ( $H_2$ ) se corresponde con la altura de agua sobre dicho pie, cuando hay un nivel constante de agua bajo la presa. En este caso, aunque no hay un nivel de agua permanente en el pie de presa, se induce que el nivel del agua en el pie de aguas abajo se encuentra en el nivel del terreno como condición más prudente.

#### 6.1.4. Variación térmica

Los incrementos y decrementos de temperatura producen en el cuerpo de presa un cambio de volumen, que en caso de que se encuentren restringidos, producen una variación tensional en la presa. En este caso, como la presa no cuenta con juntas verticales que posibiliten los cambios de volumen sin restricciones, se procederá a la simulación térmica de un año tipo, incluyendo las variaciones de nivel de embalse. El año elegido es el año hidrológico 1978/1979 pues en él se produce una variación asimilable a un año tipo.

Para la estimación de la onda térmica anual con una discretización mensual, se emplean los ajustes planteados en la publicación «Estimación de la sollicitación térmica medioambiental en el cálculo de presas a partir de información climática regional»<sup>7</sup>, la cual propone una serie de coeficientes ( $T_A$ ,  $T_B$  y  $T_{ref}$ ) para estimar la temperatura ambiente a una cota dada en función de la región climática considerada, en este caso particular la F. La expresión que se emplea para el cálculo de la temperatura ambiental es la siguiente:

$$T(z) = T_A \cdot z^2 + T_B \cdot z + T_{ref} \quad (16)$$

El incremento de temperatura por radiación se estima como 1.34 veces la radiación incidente, la cual se obtiene de la base de datos del ADRASE<sup>8</sup>. Los valores de temperatura ambiente e incremento por radiación solar estimados son los mostrados en la Tabla Nº 2.

	OCT	NOV	DIC	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP
<b>Nivel (m s.n.m.)</b>	873.5	872.8	872.3	892.7	895.8	895.6	895.5	895.3	894.8	894.2	893.7	893.4
<b>T. Ambiente (°C)</b>	17.3	14.8	12.5	11.3	11.6	12.8	13.5	14.5	16.7	19.1	20.1	19.3
<b>Radiación Solar (°C)</b>	7.05	7.98	8.73	8.05	7.36	7.14	7.37	7.89	8.00	7.89	7.12	6.33

Tabla Nº 2. Nivel de embalse, temperatura ambiente e incremento por radiación solar para el emplazamiento de la presa de Chira.

En el modelo numérico, la temperatura ambiente se aplica a todas las superficies emergidas del agua, tanto del terreno como de la presa, y en las zonas que dan al lado sur, en este caso el paramento de aguas abajo y parte del terreno, se le aplica el incremento por radiación solar.

<sup>7</sup> Cervera-Miquel, D., Escuder-Bueno, I., 2018. Estimación de la sollicitación térmica medioambiental en el cálculo de presas a partir de información climática regional. XI Jornadas Españolas de Presas.

<sup>8</sup> GRUPO DE RADIACIÓN SOLAR - CIEMAT (2012). Acceso a Datos de Radiación Solar en España (ADRASE). [www.adrase.com](http://www.adrase.com)

Para la estimación de las temperaturas del embalse, se emplea el modelo de Bofang<sup>9</sup> por su simplicidad y por tener en cuenta la variación temporal y espacial de la temperatura del agua. Las temperaturas obtenidas mediante este método, se muestran en la Ilustración N° 16. Estas temperaturas se aplican como un gradiente entre la superficie y el fondo del embalse, por lo que únicamente aplican para el cálculo con embalse lleno.

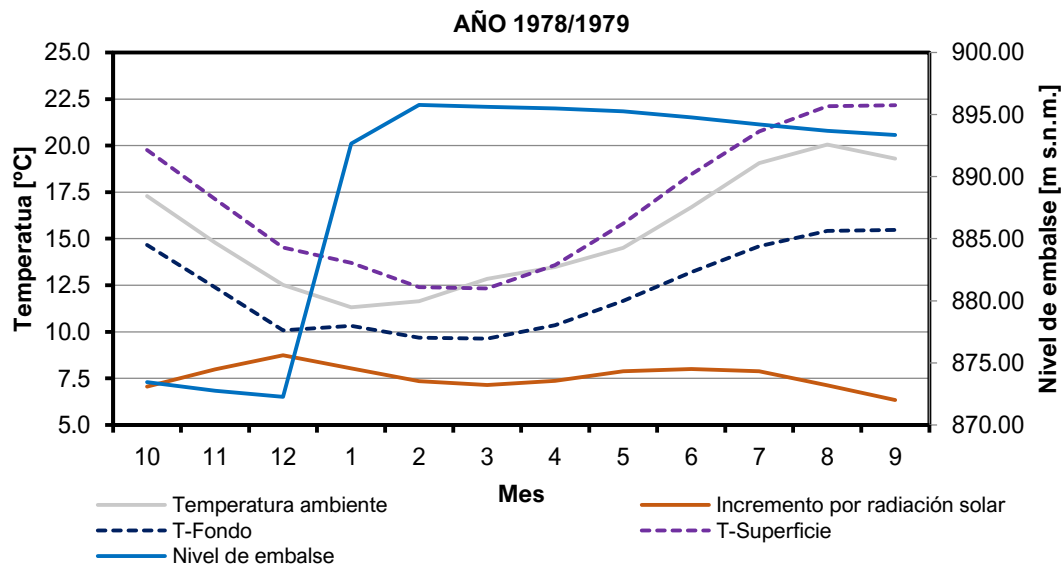


Ilustración N° 16. Evolución anual de las temperaturas y niveles en el embalse de Chira.

## 6.2. PARÁMETROS TENSO-DEFORMACIONALES DEL MODELO

Como se ha expuesto en el apartado 1 de este Informe, el comportamiento estructural de la presa se ha analizado desde una doble perspectiva. En el apartado 8 se incluyen las modelaciones realizadas una vez se ha encontrado finalizada la campaña geotécnica y, por tanto, con los parámetros que se consideran más representativos de la presa y su cimiento. Se contiene en ese apartado la estimación de las condiciones reales de respuesta estructural de la presa, a partir de modelo numérico.

En estos apartados (6 y 7) se evalúa el comportamiento de la presa en unos supuestos peores, que analizan la sensibilidad la respuesta estructural ante la degradación y la variación de los parámetros resistentes. De este modo, los parámetros resistentes y tenso-deformacionales adoptados para el modelo son los mostrados en la Tabla N° 3.

<sup>9</sup> BOFANG, Z. (2014). Thermal Stresses and Temperature Control of Mass Concrete.

	Presa	Cimiento	Contacto
<b>Material</b>	Mampostería	Ignimbritas	-
<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2100	2200	-
<b>Mod. Elasticidad [MPa]</b>	500	10 000	-
<b>Coef. Poisson</b>	0.33	0.28	-
<b>R. Tracción [MPa]</b>	0.10	2.70	0.05
<b>Cohesión [MPa]</b>	0.10	1.00	0.05
<b>Rozamiento [MPa]</b>	40.00	45.00	35.00

Tabla Nº 3. Parámetros resistentes y tenso-deformacionales empleados en el modelo de la presa de Chira.

### 6.3. ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN

El objetivo de este trabajo es la evaluación tenso-deformacional y resistente de la presa de Chira, por ello se han definido tres grupos diferentes de simulaciones con el fin de verificar el comportamiento de la estructura y el margen resistente frente a distintos escenarios de carga. Los grupos de simulación son los siguientes:

- Análisis tenso-deformacional y resistente.
- Aproximación al margen de seguridad resistente.
- Estudio de estabilidad general.

#### 6.3.1. Análisis tenso-deformacional y resistente

El análisis tenso-deformacional y resistente, tiene como objetivo verificar que para escenarios plausibles en explotación de la presa, tanto presentes como futuros, el estado tensional y de desplazamientos de la presa es compatible con un nivel de seguridad acorde a los distintos estándares nacionales e internacionales. Los escenarios a analizar, en base a las acciones que se han definido en el punto anterior son los siguientes:

- Embalse vacío.
- Embalse en umbral de aliviadero (900 m s.n.m.) + subpresión.
- Embalse a cota (901.0 m s.n.m.) + subpresión.

Todos estos escenarios se simulan en los dos modelos propuestos, empleando para ello la estimada de los parámetros resistentes y tenso-deformacionales.

#### 6.3.2. Aproximación al margen de seguridad resistente

La aproximación al margen de seguridad resistente consiste en simular los escenarios más desfavorables para la estructura hasta hallar una potencial inestabilidad en la misma. Para ello, se van variando diferentes parámetros del modelo con el objetivo de poder acotar el margen de seguridad remanente en la presa.

Estas simulaciones se plantean para el modelo 3D completo a través de cinco escenarios diferentes que a continuación se detallan:

### Escenario 1

Disminución de la cohesión, ángulo de rozamiento y resistencia a tracción del cuerpo de presa. Bajo la acción del peso propio, embalse a nivel de coronación y subpresión a nivel de la cota de aliviadero, se degradan los parámetros plásticos del cuerpo de presa con el objetivo de encontrar un conjunto de parámetros plásticos compatibles con la no plastificación de una zona significativa de la estructura.

### Escenario 2

Incremento progresivo del nivel de embalse partiendo del nivel de coronación y estudio de la plastificación del cuerpo de presa.

### Escenario 3

Disminución de la rigidez del terreno con el objetivo de estudiar la influencia del cambio de rigidez relativa entre la presa y el terreno. Para ello, se parte de las recomendaciones que efectuó Rocha en cuanto al efecto de la rigidez relativa y el comportamiento de presas de gravedad. En la Tabla N° 4 se presenta las recomendaciones realizadas por Rocha<sup>10</sup>. En este escenario se toman los valores límite de cada relación para disminuir la rigidez del cimiento, si bien se realizan comprobaciones adicionales.

Ec / Em	Influencia sobre la presa	Problemas
< 4	Despreciable	Ninguno
4 - 8	Poco importante	Menores
8 - 16	Importante	Algunos
> 16	Muy importante	Moderados a grandes

Ec: Módulo de deformación del hormigón

Em: Módulo de deformación de la cimentación

Tabla N° 4. Efecto de la relación  $E_c/E_m$  en el comportamiento de presas de gravedad según Rocha (Extraído de Romana<sup>11</sup>).

### Escenario 4

En este escenario se analiza la influencia de la variación del coeficiente de dilatación térmica. Para ello, se realizarán diversas simulaciones variando el coeficiente de dilatación térmica del material. En todos los casos, se toma como valor de referencia el coeficiente de dilatación térmica del hormigón ( $10 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ )<sup>12</sup> y se toman porcentajes de este hasta acotar el valor más alto para el cual la presa no plastifica.

### Escenario 5

En este escenario, se realiza una reducción de la resistencia a tracción de la fábrica para tener en cuenta el efecto que podrían tener sobre ella las cargas cíclicas de llenado y vaciado del embalse. Para ello, se ha minorado la resistencia a tracción de la fábrica según lo expuesto en el Eurocódigo 2<sup>12</sup>.

<sup>10</sup> ROCHA, M. "Alguns problemas relativos a Mecánica das Rochas dos materiais de baixa resistencia". 5º Congreso Panamericano de Mecánica del Suelo e Ingeniería de Cimentaciones. Buenos Aires, 1975.

ROCHA, M. "Alguns problemas relativos a Mecánica das Rochas dos materiais de baixa resistencia". Geotecnia, Revista de Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 1976, nº 18, Novembro-Dezembro. p 3-27.

<sup>11</sup> Romana Ruiz, Manuel. 2011. "Cimentaciones de presas de gravedad: requisitos geomecánicos". Revista de Obras Públicas nº 3527. Año 158.

<sup>12</sup> Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN1192-1-1.2013

$$f_{cta} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad (17)$$

Donde:  $\alpha_{ct}$ : Coeficiente que tienen en cuenta los efectos a largo plazo en la resistencia a tracción y los efectos desfavorables (valor recomendado  $\alpha_{ct} = 1$ );  $\gamma_c$ : Coeficiente parcial de seguridad ( $\gamma_c = 1$ ).

Por lo que la resistencia a tracción de la fábrica minorada es igual:

$$\sigma_T = f_{ctk,0,05} = 0.7 \cdot f_{ctm} \quad (18)$$

Una vez minorada la resistencia a tracción de la fábrica, se simula el incremento progresivo del nivel del embalse tal y como se ha desarrollado en el Escenario 2. Para evaluar el posible efecto de las cargas cíclicas y la minoración de la resistencia a tracción ambos escenarios son comparados.

## Escenario 6

En este escenario, se realiza un incremento de la densidad de la fábrica de la presa para estudiar el efecto de un aumento de la densidad sobre el estado tensional de la presa, sobre todo en el contacto entre la presa y el terreno.

## Escenario 7

En este escenario, se realiza una simulación con la subpresión reducida a 2/3 de la subpresión ineficaz por si fuera posible reducirla con alguno de los trabajos de rehabilitación de la presa.

### 6.3.3. Estudio de estabilidad general

El estudio de estabilidad de la presa se realiza empleando una rutina de degradación de parámetros que se incluye FLAC-3D que permite detectar los patrones de inestabilidad del conjunto de la estructura, por lo que la inestabilidad puede producirse tanto en el contacto entre la presa y el cimiento, como a través del mismo cuerpo de presa. Como resultado de estas simulaciones se obtiene el coeficiente de seguridad y los patrones de plastificación asociados a dicha inestabilidad.

El estudio de estabilidad se realiza empleando los modelos bidimensionales y tridimensionales, permitiendo conocer el efecto que produce la envolvente del terreno y la propia geometría de la presa en la estabilidad de la presa.

A modo de comprobación, se estima el factor de seguridad mediante el método de equilibrio límite sobre un sólido rígido, el cual es asimilable con el factor de seguridad obtenido para los modelos bidimensionales, con la diferencia que en este caso se analiza únicamente el equilibrio a lo largo de la superficie de contacto entre las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras en caso de rotura plana<sup>13</sup>:

$$T \leq \frac{N \cdot \operatorname{tg} \varphi}{F_1} + \frac{c \cdot S}{F_2} \quad (19)$$

Las situaciones para las que se analiza la estabilidad general son las siguientes:

- Embalse en umbral de aliviadero (900 m s.n.m.) + subpresión.
- Embalse a cota (901.0 m s.n.m.) + subpresión.

---

<sup>13</sup> Guías Técnicas de Seguridad de Presas: Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. Tomo 1. Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP).

## 7. RESULTADOS

### 7.1. CRITERIO DE SIGNOS

El criterio de signos empleado en la presentación de resultados es el mismo que emplea el software FLAC3D, el cual se detalla a continuación:

**Esfuerzos normales:** Las tensiones positivas indican tracción; las tensiones negativas indican compresión.

**Esfuerzos cortantes:** Con referencia a la Ilustración N° 17, un esfuerzo cortante positivo apunta en la dirección positiva del eje de coordenadas del segundo subíndice si actúa en una superficie con una normal hacia afuera en la dirección positiva. Por el contrario, si la normal hacia afuera de la superficie está en la dirección negativa, entonces la tensión positiva de corte apunta en la dirección negativa del eje de coordenadas del segundo subíndice. Los esfuerzos cortantes mostrados en la Ilustración N° 17 son todos positivos.

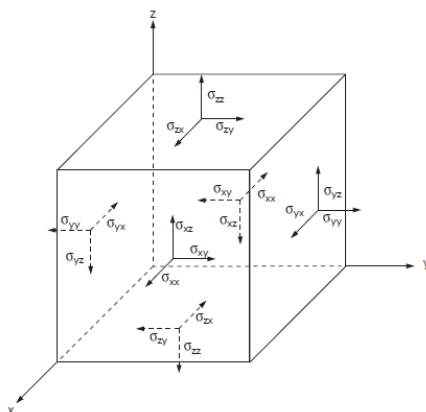


Ilustración N° 17. Criterio de signos para esfuerzos positivos.

**Desplazamiento normal:** El valor positivo indica alargamiento y el negativo indica compresión.

**Valores vectoriales:** Las componentes x, y, y z de las cantidades vectoriales, como las fuerzas, los desplazamientos y las velocidades, son positivas cuando se apunta en las direcciones de los ejes.

### Tensiones principales

Hay varios métodos comúnmente utilizados para referirse a las tensiones verticales. Es importante recordar en todo momento que en FLAC3D, las tensiones positivas indican tracción; las tensiones negativas indican compresión. La Tabla N° 5 resume algunas terminologías usadas para denotar estrés y cómo se relacionan entre sí.

	Negativo (-)	Positivo (+)	Intermedio
<b>FLAC3D</b>	Mínima	Máxima	Intermedia
<b>Uso general</b>	Mayor	Menor	Intermedia
<b>Símbolo</b>	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$

Tabla N° 5. Criterio de signos para tensiones principales.

En el caso particular de las interfaces, el criterio de signos de tensiones es inverso al resto de elementos.

## 7.2. ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL Y RESISTENTE

El análisis tenso-deformacional y resistente de la presa se realiza para los dos modelos descritos anteriormente (M3D-Bloque central y M3D-Completo). De acuerdo al modelo de diferencias finitas descrito, se muestran los siguientes resultados para los diferentes escenarios planteados:

- Máxima tracción en cuerpo de presa.
- Máxima compresión en cuerpo de presa.
- Máxima tracción vertical en el contacto presa-cimiento.
- Máxima compresión vertical en el contacto presa-cimiento.
- Máximo desplazamiento horizontal en coronación.
- Máximo desplazamiento vertical en coronación.

A continuación, se muestran los resultados más relevantes para cada uno de los escenarios simulados.

### 7.2.1. Embalse vacío

Este análisis parte de la situación en la que la presa está sometida únicamente a la acción de la gravedad. Esta hipótesis, si bien nunca es posible que se produzca pues siempre existe cierto gradiente térmico en la estructura, sirve como situación de partida para el resto de hipótesis y para comprobar el comportamiento de la presa.

A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Chira a embalse vacío:

- Ilustración N° 18. Embalse vacío. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración N° 19. Embalse vacío. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración N° 20. Embalse Vacío. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.
- Tabla N° 6. Embalse Vacío. Resumen de los resultados.

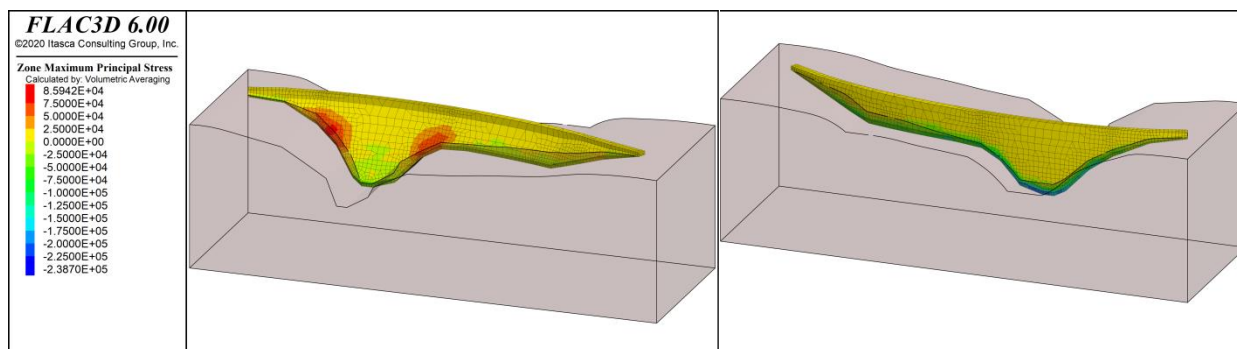


Ilustración N° 18. Embalse vacío. Tensiones Principales máximas.

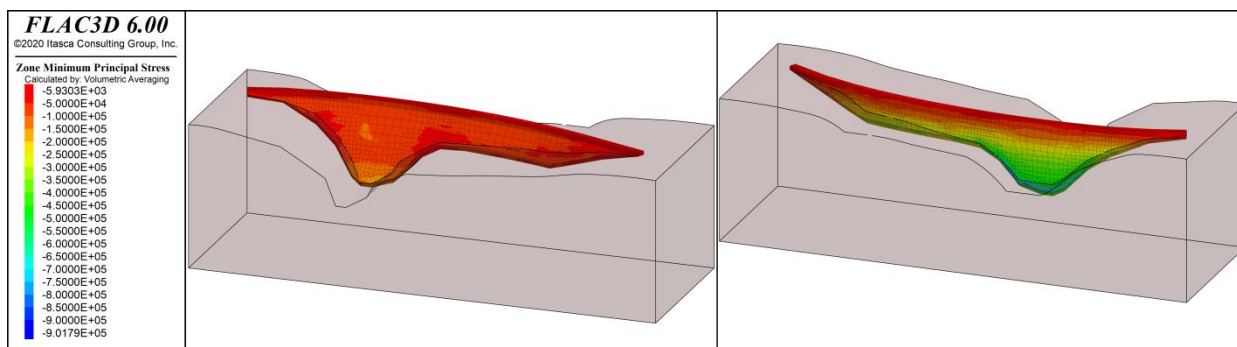


Ilustración Nº 19. Embalse vacío. Tensiones Principales mínimas.

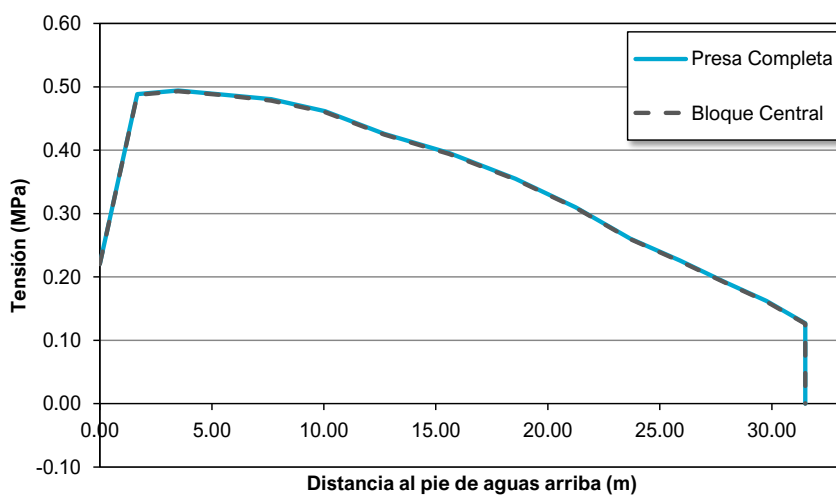


Ilustración Nº 20. Embalse Vacío. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.

EMBALSE VACÍO		
	Bloque Central	Presa Completa
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.088	0.086
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	0.900	0.902
Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.03	0.04
Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.69	0.69
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	4.5E-03	4.5E-03
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	-3.2E-03	-3.2E-03

Tabla Nº 6. Embalse Vacío. Resumen de los resultados.

### 7.2.2. Embalse en umbral de aliviadero (900,00 m s.n.m.) y subpresión

Este análisis parte de la situación a embalse a cota del umbral de aliviadero. A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Chira con nivel de embalse a umbral del aliviadero y actuando la subpresión:

- Ilustración Nº 21. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración Nº 22. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración Nº 23. Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos radiales.
- Ilustración Nº 24. Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.
- Ilustración Nº 25. Embalse a umbral del aliviadero. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.

- Tabla Nº 7. Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados.

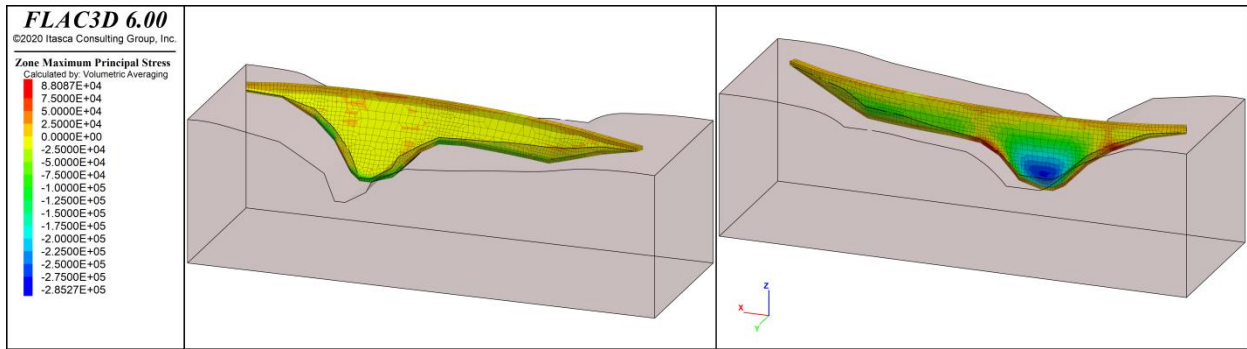


Ilustración Nº 21. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.

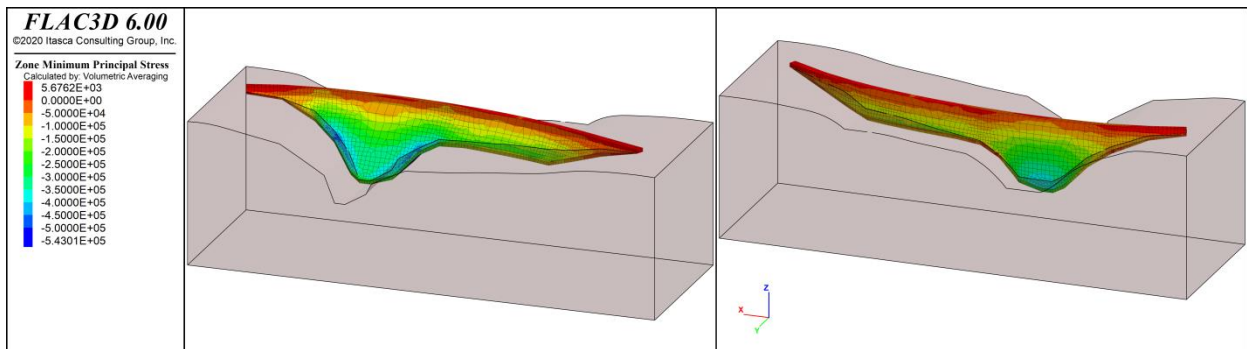


Ilustración Nº 22. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.

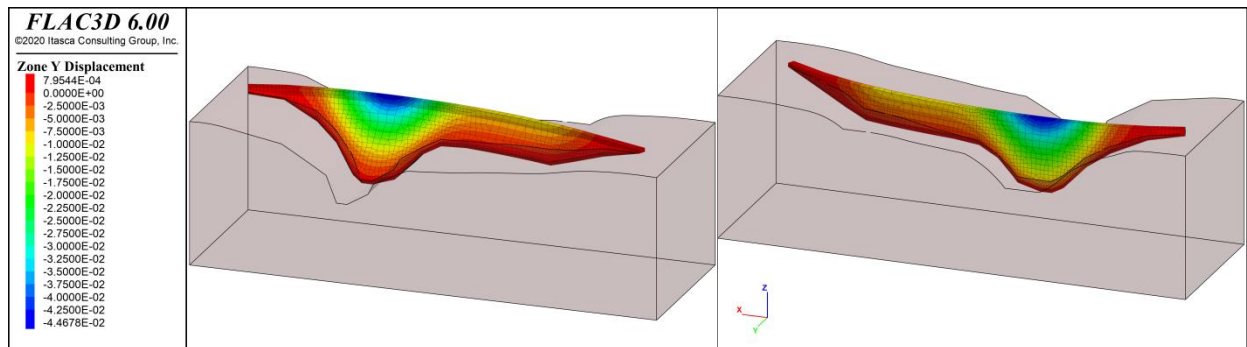


Ilustración Nº 23. Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos radiales.

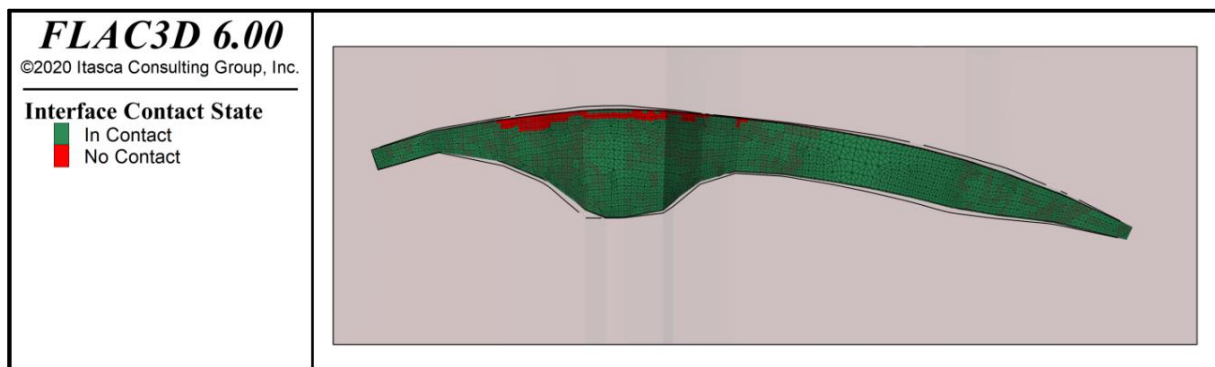


Ilustración Nº 24. Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.

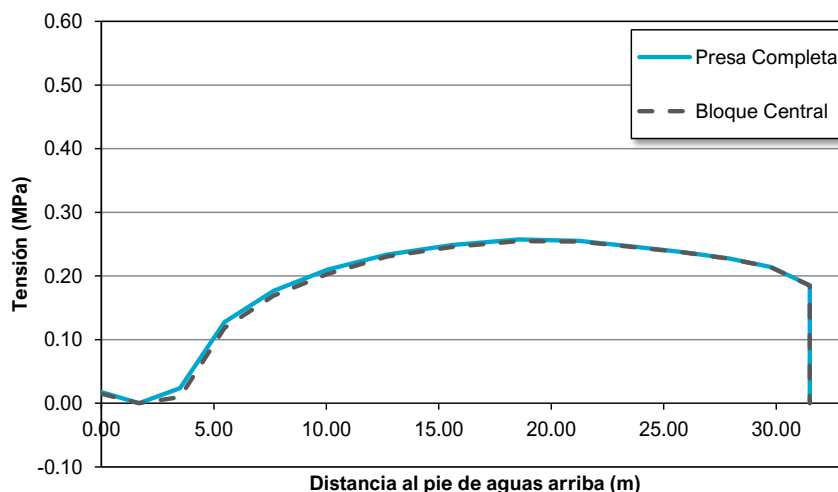


Ilustración N° 25. Embalse a umbral del aliviadero. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.

EMBALSE A UMBRAL DE ALIVIADERO		
	Bloque Central	Presa Completa
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.111	0.088
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	0.589	0.543
Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.05	0.05
Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	2.68	2.52
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	4.6E-02	4.5E-02
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	1.3E-02	1.3E-02

Tabla N° 7. Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados.

### 7.2.3. Embalse en nivel de coronación (901.00 m s.n.m.) y subpresión

Este análisis parte de la situación a embalse a la cota de coronación. A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Chira con nivel de embalse a la cota de coronación y actuando la subpresión:

- Ilustración N° 26. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración N° 27. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración N° 28. Embalse a cota de coronación. Desplazamientos radiales.
- Ilustración N° 29. Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento.
- Ilustración N° 30. Embalse a cota de coronación. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.
- Tabla N° 8. Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados.

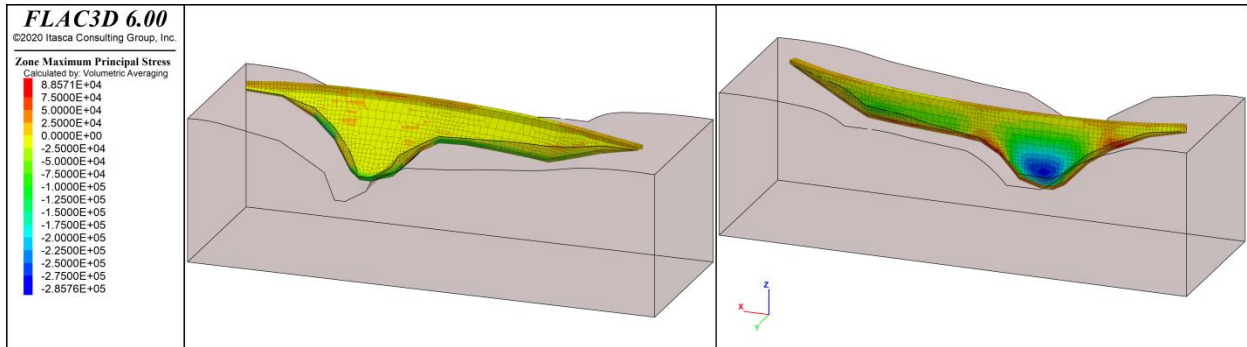


Ilustración N° 26. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.

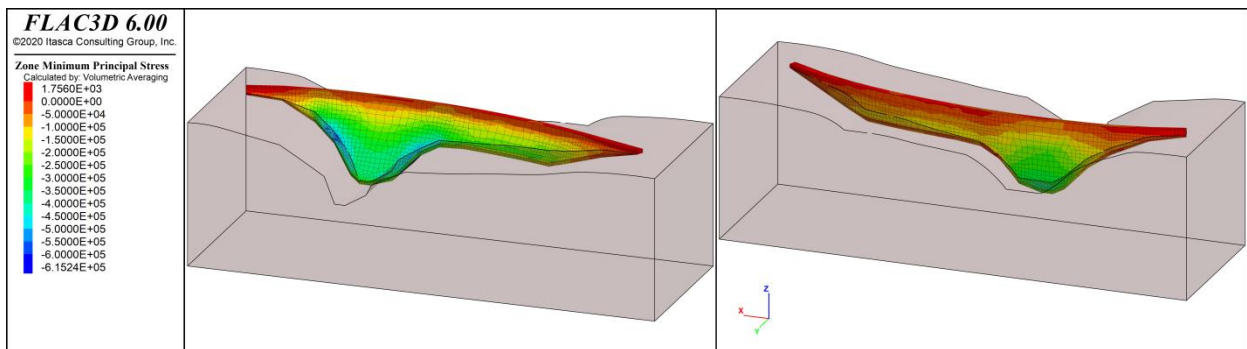


Ilustración N° 27. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas.

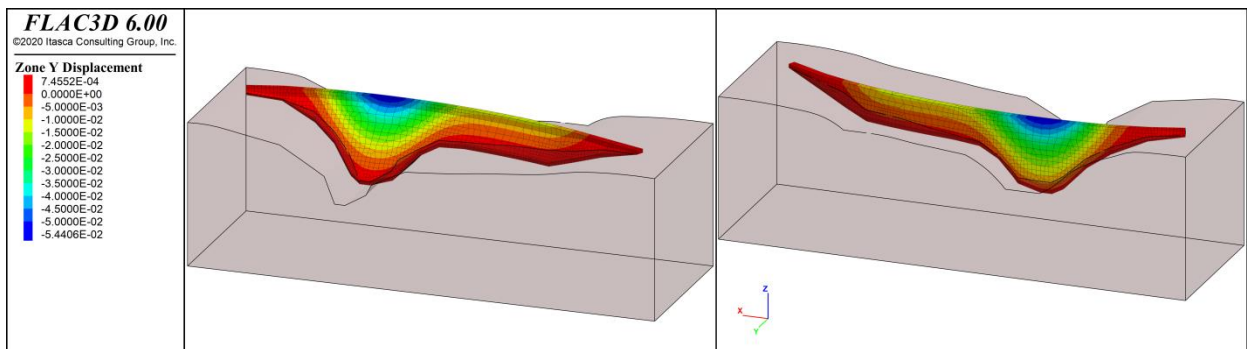


Ilustración N° 28. Embalse a cota de coronación. Desplazamientos radiales.

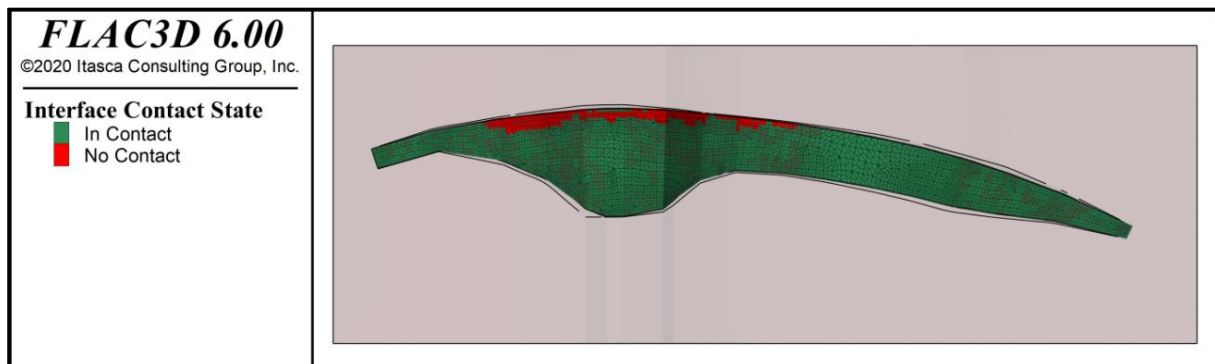


Ilustración N° 29. Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento.

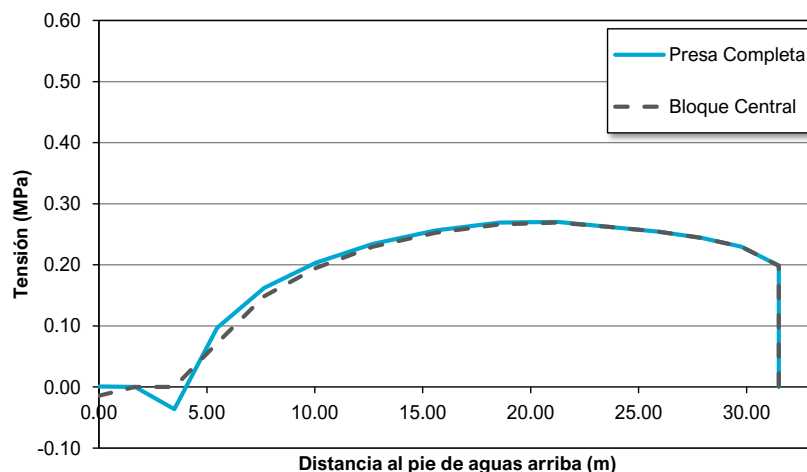


Ilustración N° 30. Embalse a cota de coronación. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.

EMBALSE A COTA DE CORONACIÓN		
	Bloque Central	Presa Completa
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.118	0.089
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	0.700	0.615
Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.05	0.05
Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	3.10	2.92
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	5.6E-02	5.4E-02
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	1.7E-02	1.6E-02

Tabla N° 8. Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados.

### 7.3. APROXIMACIÓN AL MARGEN DE SEGURIDAD RESISTENTE

#### 7.3.1. Escenario 1. Variación de la cohesión, fricción y tracción

Este escenario tiene como objetivo localizar las zonas de plastificación en el cuerpo de la presa degradando, para ello, los parámetros plásticos mediante un coeficiente reductor o multiplicador, tal y como se muestra en la Tabla N° 9.

	c (MPa)	$\phi$ (°)	$\sigma_T$ (MPa)	CR
<b>Caso Base</b>	0.10	40.00	0.10	1
<b>Caso 1A</b>	0.15	51.53	0.15	1.5*
<b>Caso 1B</b>	0.08	33.87	0.08	1.25
<b>Caso 1C</b>	0.07	29.22	0.07	1.5
<b>Caso 1D</b>	0.06	25.62	0.06	1.75
<b>Caso 1E</b>	0.05	22.76	0.05	2

Tabla N° 9. Casos planteados para el Escenario 1.

Como resultado, el Escenario 1E implica un nivel de plastificación tal que el modelo no llega a converger, mientras que el escenario 1A supone que no se produce ninguna plastificación de ningún elemento si quiera aislado.

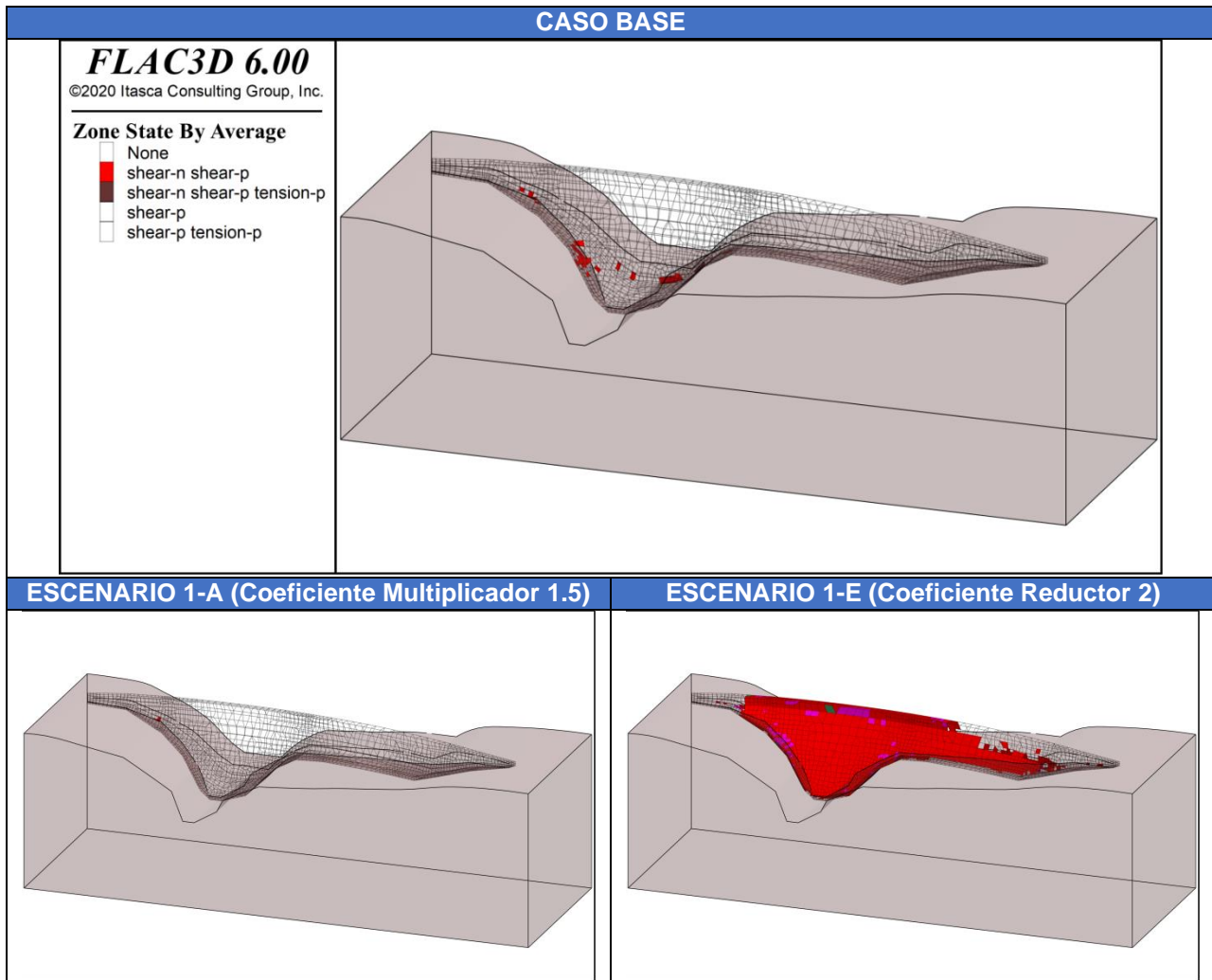


Ilustración Nº 31. Resultados Escenario 1.

### 7.3.2. Escenario 2. Incremento progresivo del nivel de embalse.

Este escenario tiene como objetivo localizar posibles zonas de plastificación causadas por el incremento del nivel de embalse. Para ello, se plantean diversos escenarios en los cuales se ha aumentado progresivamente el nivel de embalse hasta identificar una posible zona de plastificación de la estructura. Los niveles estudiados son los mostrados en la Tabla Nº 10.

	Nivel	Altura sobre coronación
<b>Caso Base</b>	901.00	0.00
<b>Caso 2A</b>	905.00	4.00
<b>Caso 2B</b>	910.00	9.00

Tabla Nº 10. Casos planteados para el Escenario 2.

Como se puede observar en la Ilustración Nº 32, para un nivel de embalse de 4 metros sobre coronación, se produce una plastificación generalizada en la estructura. Para el siguiente escalón de carga de 9 metros sobre coronación, el modelo no consigue converger.

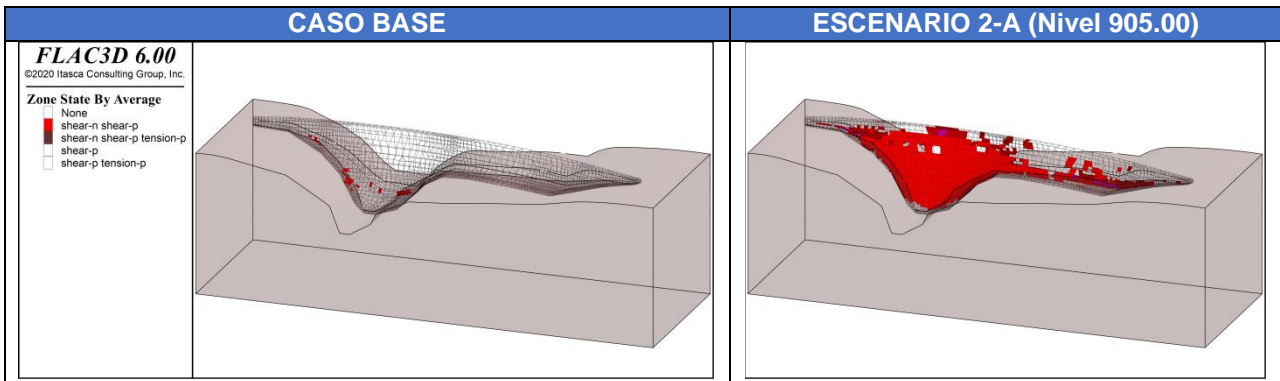


Ilustración N° 32. Resultados Escenario 2.

### 7.3.3. Escenario 3. Rigidez relativa presa-cimiento

Este escenario tiene como objetivo evaluar la influencia que tiene un aumento de la rigidez relativa entre la presa y el terreno. Para ello, se ha disminuido la rigidez del terreno a partir de los coeficientes definidos en el Apartado 6.3.2, aplicando los módulos de elasticidad al terreno que se muestran en la Tabla N° 11.

	Rigidez relativa	$E_{PRESA}$ (MPa)	$E_{TERRENO}$ (MPa)
<b>Caso Base</b>	0.05	500	10 000
<b>Caso 3A</b>	0.10	500	5 000
<b>Caso 3B</b>	1.00	500	500
<b>Caso 3C</b>	4.00	500	125
<b>Caso 3D</b>	8.00	500	63
<b>Caso 3E</b>	16.00	500	31.25
<b>Caso 3F</b>	0.10	1 000	10 000
<b>Caso 3G</b>	0.20	1 000	5 000

Tabla N° 11. Casos planteados para el Escenario 3.

Los resultados de estas simulaciones se muestran en las Tabla N° 12 y Tabla N° 13. También se muestra la distribución de tensiones en la base de la presa en la Ilustración N° 33.

	Caso Base	Caso 3A	Caso 3B	Caso 3C
	$E = 500 / 10\ 000$	$E = 500 / 5000$	$E = 500 / 500$	$E = 500 / 125$
<b>Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)</b>	0.089	0.088	0.091	0.086
<b>Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)</b>	0.615	0.639	1.047	1.364
<b>Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)</b>	0.05			
<b>Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)</b>	2.92			
<b>Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)</b>	5.4E-02	5.6E-02	8.3E-02	1.7E-01
<b>Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)</b>	1.6E-02	1.7E-02	2.8E-02	6.1E-02

Tabla N° 12. Escenario 3. Resumen de resultados (I/II).

	Caso 3D	Caso 3E	Caso 3F	Caso 3G
	E = 500 / 63	E = 500 / 31.25	E = 1000 / 10 000	E = 1000 / 5000
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.089	0.091	0.088	0.088
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	1.462	1.518	0.638	0.992
Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)				
Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)				
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	2.8E-01	4.7E-01	2.8E-02	3.0E-02
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	1.0E-01	1.8E-01	8.3E-03	8.9E-03

Tabla N° 13. Escenario 3. Resumen de resultados (II/II).

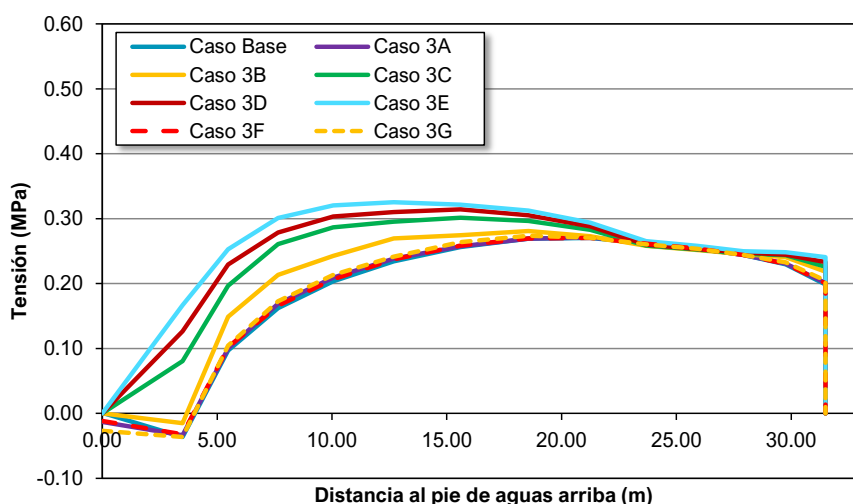


Ilustración N° 33. Distribución tensional en la base de la presa para el Escenario 3.

#### 7.3.4. Escenario 4. Variación del coeficiente de dilatación térmica

Este escenario tiene como objetivo analizar el posible efecto que tiene la variación del coeficiente de dilatación térmica en la estructura para un ciclo de llenado y vaciado anual. Para ello, se ha ido incrementando progresivamente dicho coeficiente tomando como referencia el coeficiente de dilatación térmica del hormigón ( $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )<sup>14</sup>. Los escenarios planteados se observan en la Tabla N° 14.

	Coeficiente de dilatación Térmica ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	
Caso 4A	$1 \cdot 10^{-6}$	0.1 x Hormigón
Caso 4B	$2 \cdot 10^{-6}$	0.2 x Hormigón
Caso 4C	$3 \cdot 10^{-6}$	0.3 x Hormigón
Caso 4D	$4 \cdot 10^{-6}$	0.4 x Hormigón
Caso 4E	$5 \cdot 10^{-6}$	0.5 x Hormigón
Caso 4F	$6 \cdot 10^{-6}$	0.6 x Hormigón
Caso 4G	$8 \cdot 10^{-6}$	0.8 x Hormigón
Caso 4H	$10 \cdot 10^{-6}$	1.0 x Hormigón

Tabla N° 14. Casos planteados para el Escenario 4.

<sup>14</sup> Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN1192-1-1.2013.

En este caso, y tal y como se muestra en la Ilustración Nº 34, a partir de un coeficiente de dilatación térmica de  $3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  se empieza a producir una plastificación más generalizada en el cuerpo de presa.

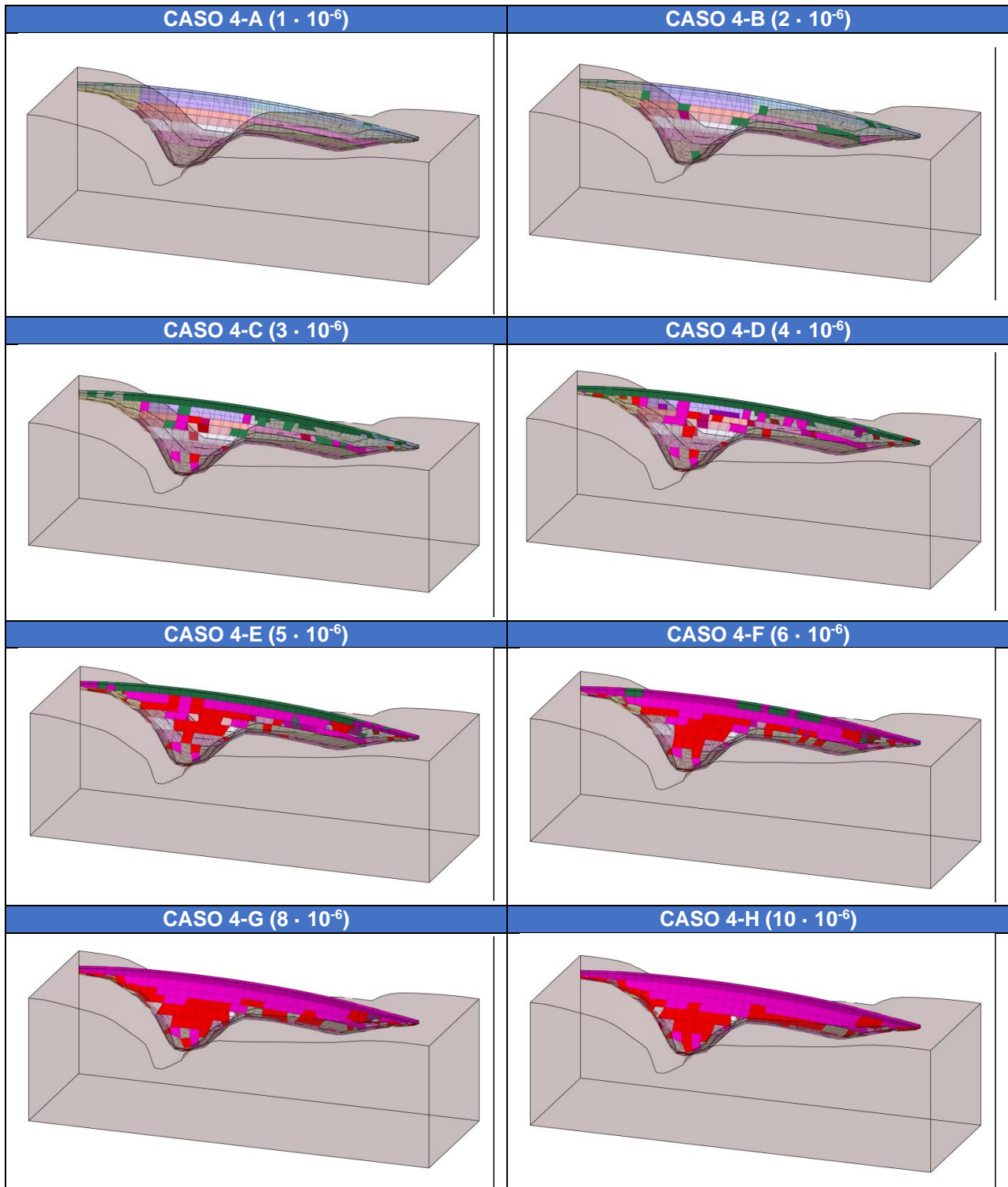


Ilustración Nº 34. Resultados Escenario 4.

### 7.3.5. Escenario 5. Resistencia a tracción minorada y subida del nivel de embalse

El objetivo de este escenario es capturar el posible efecto que las cargas cíclicas pueden tener en la estructura. Para ello, se ha minorado la resistencia a tracción de la fábrica según lo expuesto en el Apartado 6.3.2. Por lo que la resistencia a tracción de la fábrica minorada resulta igual a 0.07 MPa:

$$\sigma_T = 0.7 \cdot 0.1 = 0.07 \text{ MPa} \quad (20)$$

En este caso, la altura de sobrevertido que agota la capacidad resistente de la presa se reduce respecto del Escenario 2, si bien, sigue manteniéndose la integridad estructural de la presa incluso superados los 4 metros de sobrevertido.

### 7.3.6. Escenario 6. Incremento de la densidad

El objetivo de este escenario es estudiar el efecto que tiene el incremento de la densidad de la fábrica de la presa en el estado tensional del contacto entre la presa y el cemento. Para ello se han realizado varias simulaciones para embalse a nivel de coronación incrementando la densidad hasta 2400 kg/m<sup>3</sup>. En la Ilustración N° 35 se presentan los resultados obtenidos, donde se observa que el incremento de la densidad no produce efectos significativos en la distribución de tensiones en la base.

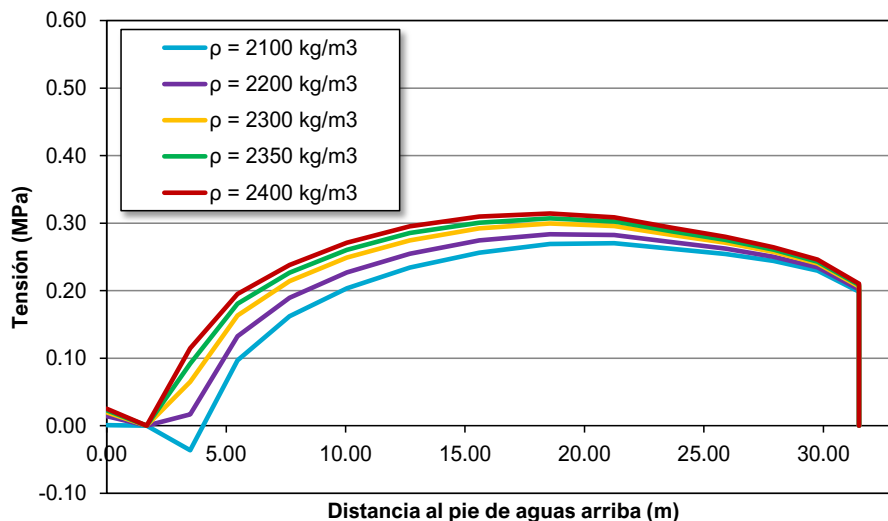


Ilustración N° 35. Resultados Escenario 6.

### 7.3.7. Escenario 7. Reducción de subpresión

El objetivo de este escenario es estudiar el efecto máximo a efectos tensionales que se podría alcanzar con una reducción de la subpresión en el contacto entre la presa y el cemento de la presa. Para ello se han simulado las situaciones con drenes ineficaces y con dicha subpresión reducida a 2/3 para el embalse a nivel de umbral de aliviadero y de coronación. En la Ilustración N° 36 se presentan los resultados obtenidos.

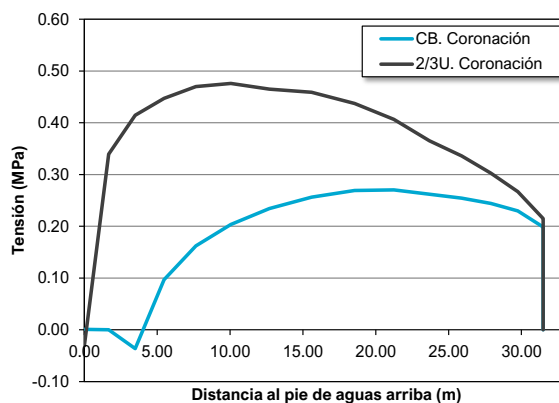
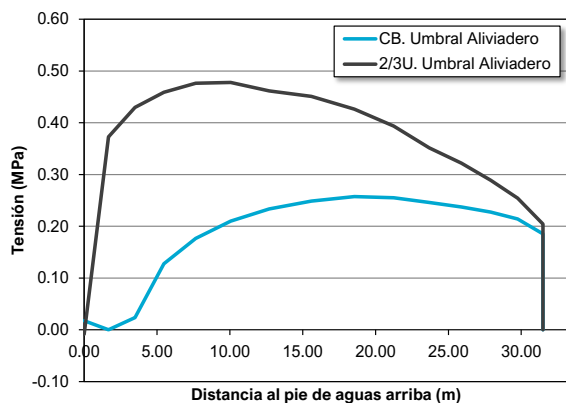


Ilustración N° 36. Resultados Escenario 7.

#### 7.4. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GENERAL

Desde el punto de vista de la estabilidad general, se ha cuantificado el margen de seguridad estimado para los dos modelos confeccionados. Los márgenes de seguridad obtenidos se muestran en la Tabla N° 15.

Hipótesis	Bloque Central	Presa Completa
Embalse a Umbral de Aliviadero + Subpresión	1.762	1.820
Embalse a Cota de Coronación + Subpresión	1.637	1.700

Tabla N° 15. Coeficientes de seguridad frente a la estabilidad general.

## 8. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES REALES DE SEGURIDAD

En la Tabla Nº 16, se resumen los parámetros que se consideran como más representativos del comportamiento de la presa de Chira y definidos una vez se ha finalizado la campaña geotécnica.

	Presa	Cimiento	Contacto
<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2100	2200	-
<b>Mod. Elasticidad [MPa]</b>	1000	10 000	-
<b>Coef. Poisson</b>	0.33	0.28	-
<b>R. Tracción [MPa]</b>	0.20	2.70	0.10
<b>Cohesión [MPa]</b>	0.20	1.00	0.10
<b>Rozamiento [MPa]</b>	45.00	45.00	40.00

Tabla Nº 16. Parámetros resistentes y tenso-deformacionales representativos de la presa de Chira.

### 8.1. ANÁLISIS TENSO-DEFORMACIONAL

#### 8.1.1. Embalse vacío

Este análisis parte de la situación en la que la presa está sometida únicamente a la acción de la gravedad. A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Chira a embalse vacío:

- Ilustración Nº 37. Embalse vacío. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración Nº 38. Embalse vacío. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración Nº 47. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.
- Tabla Nº 17. Embalse Vacío. Resumen de los resultados.

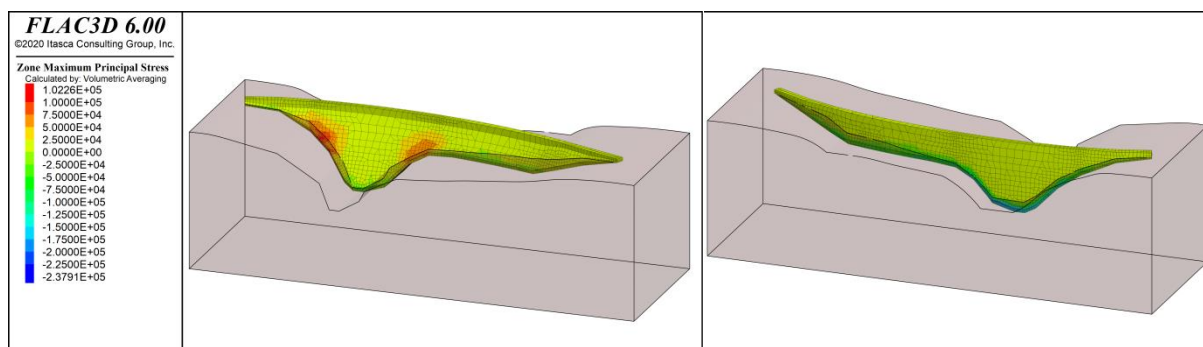


Ilustración Nº 37. Embalse vacío. Tensiones Principales máximas.

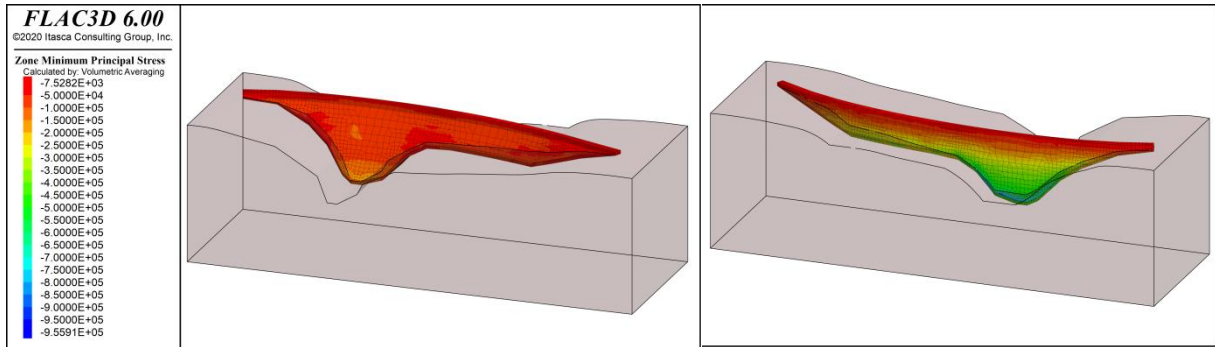


Ilustración N° 38. Embalse vacío. Tensiones Principales mínimas.

EMBALSE VACÍO	
	Presya Completa
<b>Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)</b>	0.102
<b>Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)</b>	0.956
<b>Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)</b>	0.08
<b>Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)</b>	0.70

Tabla N° 17. Embalse Vacío. Resumen de los resultados.

### 8.1.2. Embalse en umbral de aliviadero (900 m s.n.m.) y subpresión

Este análisis parte de la situación a embalse a cota del umbral de aliviadero. La ley de subpresiones se ha supuesto trapezoidal, con una zona de máxima subpresión con una longitud de 4 metros. A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Chira con estas hipótesis:

- Ilustración N° 39. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración N° 40. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración N° 41. Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos radiales.
- Ilustración N° 42. Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.
- Ilustración N° 47. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.
- Tabla N° 18. Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados.

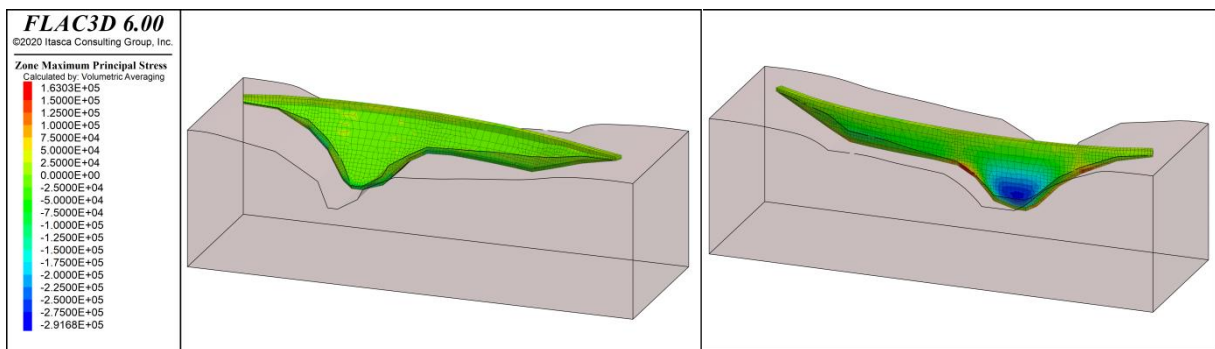


Ilustración N° 39. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.

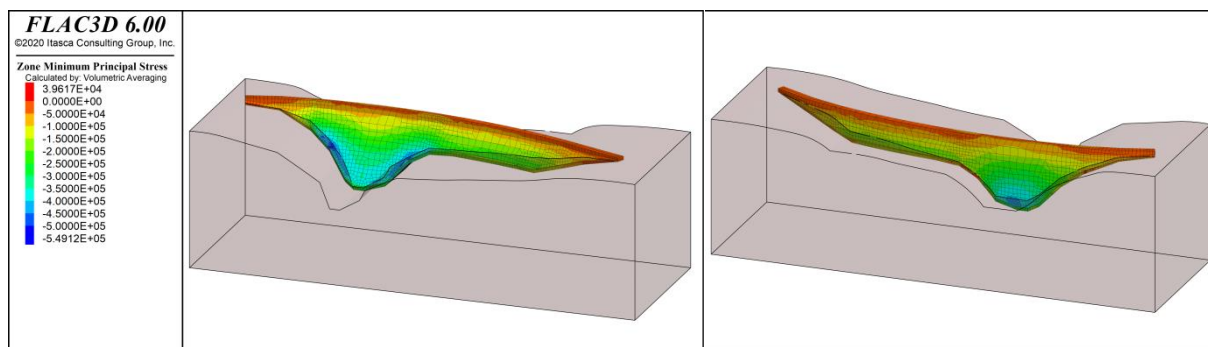


Ilustración N° 40. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.

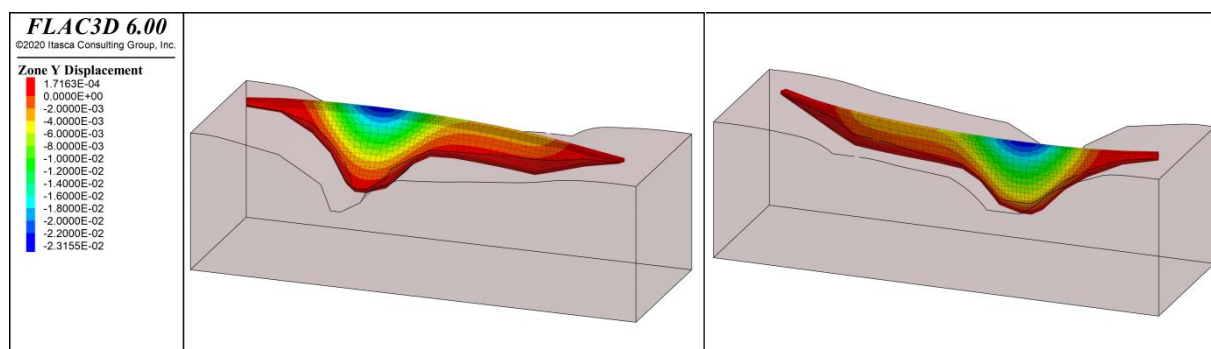


Ilustración N° 41. Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos radiales.

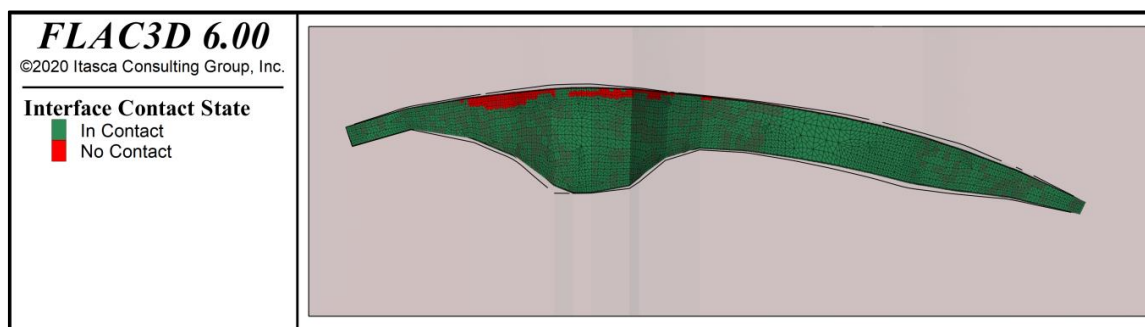


Ilustración N° 42. Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.

EMBALSE A UMBRAL DE ALIVIADERO	
	Presa Completa
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.163
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	0.549
Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.10
Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	2.62
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	2.3E-02
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	6.9E-03

Tabla N° 18. Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados.

### 8.1.3. Embalse a cota (901.00 m s.n.m.) y subpresión

Este análisis parte de la situación a embalse a la cota 901 m. La ley de subpresiones se ha supuesto trapezoidal, con una zona de máxima subpresión con una longitud de 4 metros. A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Chira con estas hipótesis:

- Ilustración N° 43. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración N° 44. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración N° 45. Embalse a cota de coronación. Desplazamientos radiales.
- Ilustración N° 46. Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento.
- Ilustración N° 47. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.
- Tabla N° 19. Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados.

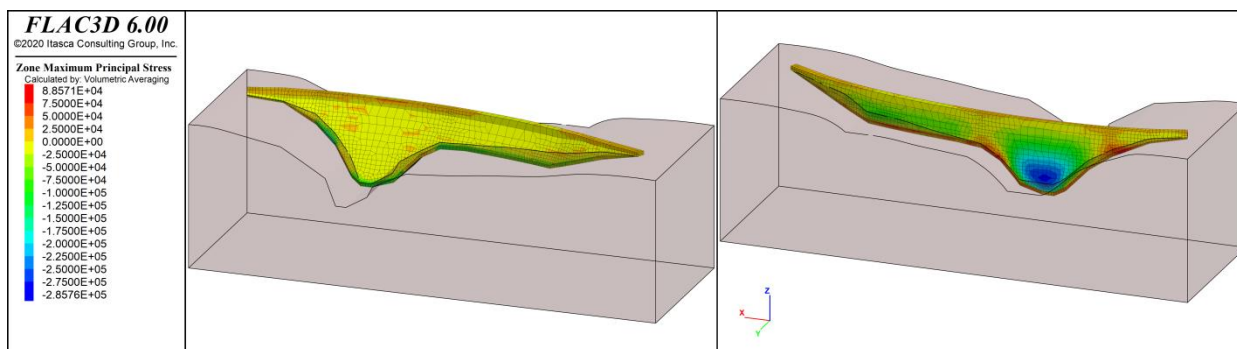


Ilustración N° 43. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.

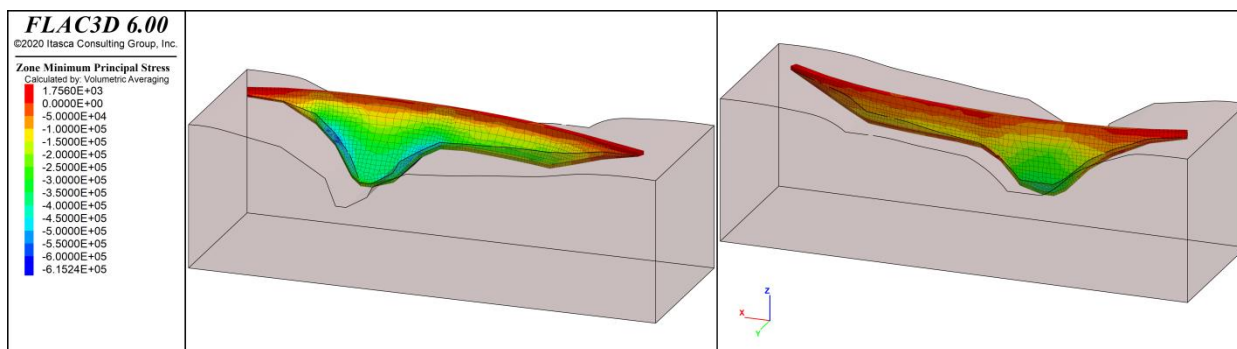


Ilustración N° 44. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas.

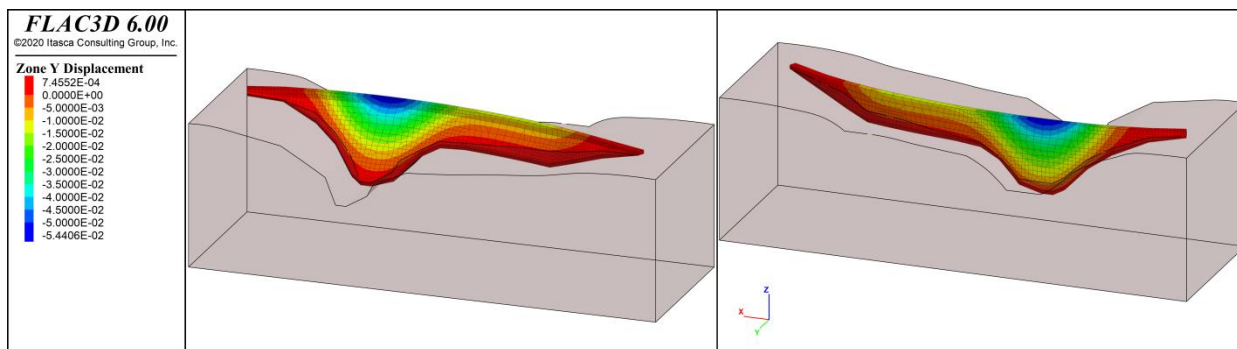


Ilustración N° 45. Embalse a cota de coronación. Desplazamientos radiales.

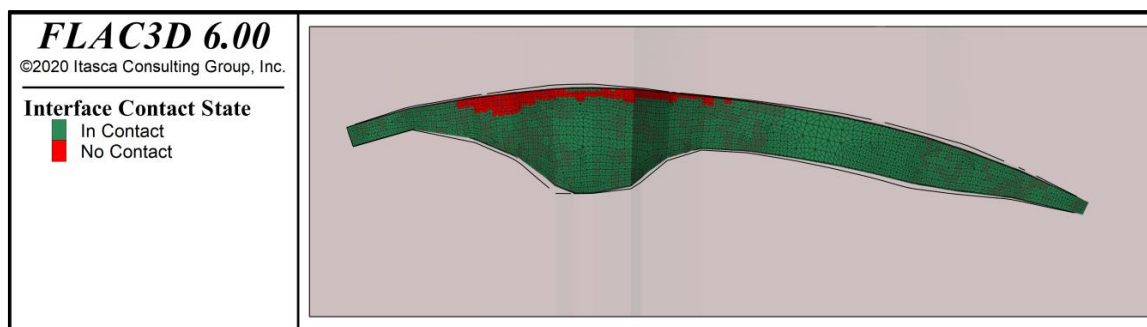


Ilustración N° 46. Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento.

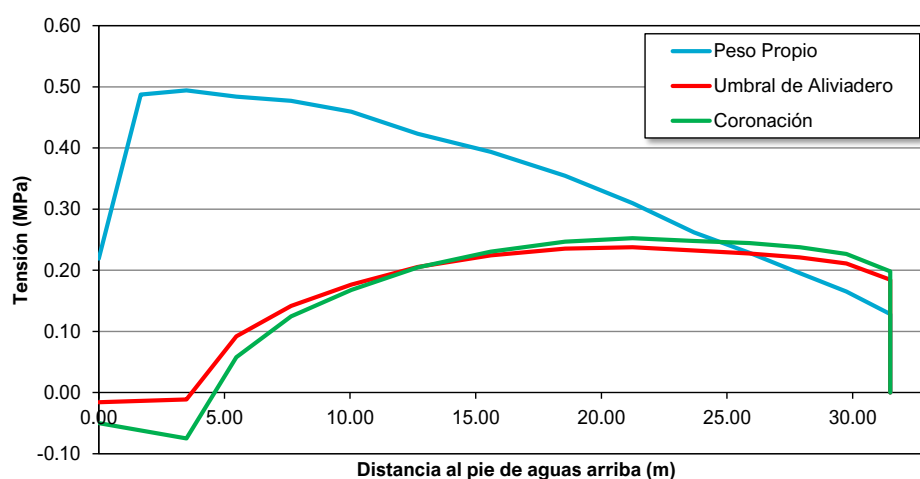


Ilustración N° 47. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.

EMBALSE A COTA DE CORONACIÓN	
	Presa Completa
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.160
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	0.660
Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.10
Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa)	3.06
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	2.8E-02
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	8.5E-03

Tabla N° 19. Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados.

## 8.2. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD GENERAL

Desde el punto de vista de la estabilidad general, se ha cuantificado el margen de seguridad estimado para los parámetros resistentes representativos. Los márgenes de seguridad obtenidos se muestran en la Tabla N° 20.

Hipótesis	Presa Completa
Embalse a Umbral de Aliviadero + Subpresión	2.508
Embalse a Cota de Coronación + Subpresión	2.330

Tabla N° 20. Coeficientes de seguridad frente a la estabilidad general.

## 9. CONCLUSIONES

En el presente Informe se ha analizado la respuesta estructural de la presa, mediante modelo numérico, en un elevado número de escenarios.

Los parámetros geo-mecánicos representativos del cuerpo de presa y su cimentación y la modelación estructural en 3 dimensiones, por diferencias finitas y en régimen elástico y no lineal muestra unas condiciones de seguridad satisfactorias de la presa de Chira (Apartado 8), tanto en el análisis minucioso de la respuesta de la presa a las distintas acciones como con relación a la Normativa de aplicación (Normas Técnicas de Seguridad) y guías y recomendaciones.

Asimismo, dada la edad de la estructura, así como sus condiciones originarias de ejecución, se ha estimado oportuno englobar en los cálculos el análisis de la respuesta de la presa bajo distintos escenarios de degradación de parámetros geo-mecánicos, análisis de la sensibilidad en la respuesta de la presa a la variación de estos parámetros y aumento de la magnitud de las acciones sobre la misma (Apartado 6 y 7). El resultado es que, aun con una obvia reducción de los márgenes de seguridad con respecto de los parámetros representativos, la seguridad estructural de la presa sigue siendo satisfactoria.

Con los resultados obtenidos y los análisis de sensibilidad llevados a cabo, se concluye que la Presa de Chira presenta un buen comportamiento tenso-deformacional y márgenes de seguridad holgados respecto de su estabilidad general, estando garantizadas sus condiciones de seguridad estructural.