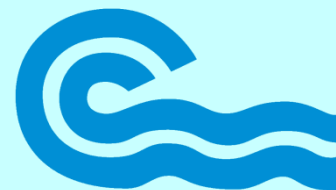


**INFORME SOBRE LA COMPROBACIÓN
NUMÉRICA GEO-ESTRUCTURAL
PRESA DE SORIA**

SEPTIEMBRE 2021



**CONSEJO INSULAR
DE AGUAS
DE GRAN CANARIA**

| ÍNDICE | PÁGINA |
|---|---------------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 5 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 6 |
| 2.1. Modelación numérica de las presas de Chira y Soria (2017)..... | 6 |
| 3. SOFTWARE EMPLEADO EN LA MODELIZACIÓN | 7 |
| 3.1. Tipo de elementos de cálculo | 7 |
| 3.2. Dimensiones de los elementos..... | 8 |
| 4. MODELOS NUMÉRICOS..... | 9 |
| 4.1. Definición geométrica de los modelos | 9 |
| 4.1.1. Modelo tridimensional (M3D)..... | 10 |
| 5. MODELOS CONSTITUTIVOS..... | 14 |
| 5.1. Modelo elástico e isótropo | 14 |
| 5.2. Modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb..... | 15 |
| 6. DEFINICIÓN DE ACCIONES Y ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN | 18 |
| 6.1. Acciones..... | 18 |
| 6.1.1. Peso propio..... | 18 |
| 6.1.2. Empuje hidráulico | 19 |
| 6.1.3. Subpresión..... | 19 |
| 6.1.4. Variación térmica | 20 |
| 6.2. Parámetros tenso-deformacionales del modelo | 21 |
| 6.3. Estrategias de simulación | 22 |
| 6.3.1. Análisis tenso-deformacional y resistente | 22 |
| 6.3.2. Análisis de sensibilidad | 22 |
| 7. RESULTADOS | 23 |
| 7.1. Criterio de signos..... | 23 |
| 7.2. Análisis tenso-deformacional y resistente | 24 |
| 7.2.1. Embalse vacío. Sin juntas inyectadas | 24 |
| 7.2.2. Embalse vacío. Juntas inyectadas | 26 |
| 7.2.3. Embalse en umbral de aliviadero (605.64 m s.n.m.) y subpresión | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 7.2.4. Embalse en nivel de coronación (607.77 m s.n.m.) y subpresión..... | 30 |
| 7.2.5. Simulación Térmica Anual | 32 |
| 7.2.6. Embalse en umbral de aliviadero (605.64 m s.n.m.) + Onda Térmica Anual | 33 |
| 7.3. Estimación del margen resistente | 34 |
| 7.4. Análisis de sensibilidad..... | 34 |
| 7.4.1. Variación del módulo de elasticidad del terreno..... | 34 |
| 7.4.2. Hipótesis de subpresión | 35 |
| 8. CONCLUSIONES | 38 |

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

| | |
|--|----|
| Ilustración Nº 1. Geometría del modelo numérico estructural del estudio de 2017. | 6 |
| Ilustración Nº 2. Elemento primitivo tipo «brick» con detalle de sus nodos y caras..... | 8 |
| Ilustración Nº 3. Nube de puntos obtenida por el vuelo del dron en la presa de Soria. | 9 |
| Ilustración Nº 4. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo..... | 10 |
| Ilustración Nº 5. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba. | 11 |
| Ilustración Nº 6. Vista en planta del modelo 3D completo..... | 11 |
| Ilustración Nº 7. Vista en perspectiva del Modelo 3D con sus interfaces..... | 12 |
| Ilustración Nº 8. Vista en perspectiva del Modelo 3D con las condiciones de contorno. | 12 |
| Ilustración Nº 9. Vista en perspectiva del Modelo 3D con detalle de la presa. | 13 |
| Ilustración Nº 10. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb en FLAC3D..... | 16 |
| Ilustración Nº 11. Dominios del modelo Mohr-Coulomb utilizados en la definición de la regla de flujo | 17 |
| Ilustración Nº 12. Ley de subpresiones. Caso estático, sin pantalla de drenaje. Sin grieta bajo del pie de aguas arriba..... | 19 |
| Ilustración Nº 13. Evolución anual de las temperaturas y niveles en el embalse de Soria. | 21 |
| Ilustración Nº 14. Criterio de signos para esfuerzos positivos..... | 23 |
| Ilustración Nº 15. Embalse vacío. Juntas sin inyectar. Tensiones Principales máximas..... | 24 |
| Ilustración Nº 16. Embalse vacío. Juntas sin inyectar. Tensiones Principales mínimas..... | 25 |

| | | |
|--------------------|--|----|
| Ilustración Nº 17. | Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Desplazamientos. | 25 |
| Ilustración Nº 18. | Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Tensor de tensiones | 25 |
| Ilustración Nº 19. | Embalse vacío. Juntas inyectadas. Tensiones Principales máximas..... | 26 |
| Ilustración Nº 20. | Embalse vacío. Juntas inyectadas. Tensiones Principales mínimas. | 27 |
| Ilustración Nº 21. | Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Desplazamientos. | 27 |
| Ilustración Nº 22. | Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Tensor de tensiones | 27 |
| Ilustración Nº 23. | Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas..... | 28 |
| Ilustración Nº 24. | Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas..... | 28 |
| Ilustración Nº 25. | Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos. | 29 |
| Ilustración Nº 26. | Embalse a umbral del aliviadero. Tensor de tensiones..... | 29 |
| Ilustración Nº 27. | Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento..... | 29 |
| Ilustración Nº 28. | Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas..... | 30 |
| Ilustración Nº 29. | Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas. | 30 |
| Ilustración Nº 30. | Embalse a cota de coronación. Desplazamientos. | 31 |
| Ilustración Nº 31. | Embalse a cota de coronación. Tensor de tensiones..... | 31 |
| Ilustración Nº 32. | Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento. | 31 |
| Ilustración Nº 33. | Simulación térmica anual. Tensiones Principales máximas. | 32 |
| Ilustración Nº 34. | Simulación térmica anual. Tensiones Principales mínimas..... | 32 |
| Ilustración Nº 35. | Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Tensiones Principales máximas. | 33 |
| Ilustración Nº 36. | Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Tensiones Principales mínimas. | 33 |
| Ilustración Nº 37. | Análisis de sensibilidad. Estado del contacto sin subpresión. | 35 |
| Ilustración Nº 38. | Análisis de sensibilidad. Estado del contacto con 1/3 de la subpresión con drenes ineficaces. | 36 |
| Ilustración Nº 39. | Análisis de sensibilidad. Estado del contacto con 2/3 de la subpresión con drenes ineficaces. | 36 |

Ilustración Nº 40. Análisis de sensibilidad. Tensiones en el contacto para las 4 hipótesis de subpresión consideradas.37

ÍNDICE DE TABLAS PÁGINA

| | | |
|--------------|--|----|
| Tabla Nº 1. | Propiedades materiales empleadas en el modelo estructural de 2017. | 6 |
| Tabla Nº 2. | Nivel de embalse del año 2011/2012, temperatura ambiente e incremento por radiación solar para el emplazamiento de la presa de Soria. | 20 |
| Tabla Nº 3. | Parámetros resistentes y tenso-deformacionales empleados en el modelo de la presa de Soria. | 21 |
| Tabla Nº 4. | Criterio de signos para tensiones principales. | 23 |
| Tabla Nº 5. | Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Resumen de los resultados. | 26 |
| Tabla Nº 6. | Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Resumen de los resultados. | 28 |
| Tabla Nº 7. | Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados. | 30 |
| Tabla Nº 8. | Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados. | 32 |
| Tabla Nº 9. | Simulación térmica anual. Resumen de los resultados. | 33 |
| Tabla Nº 10. | Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Resumen de los resultados. | 33 |
| Tabla Nº 11. | Análisis de sensibilidad. Embalse vacío. | 34 |
| Tabla Nº 12. | Análisis de sensibilidad. Embalse a umbral del aliviadero. | 34 |
| Tabla Nº 13. | Análisis de sensibilidad. Embalse a cota de coronación. | 35 |

1. INTRODUCCIÓN

El objeto de este documento es actualizar el modelo de comportamiento tenso-deformacional de la presa de Soria (Gran Canaria) realizado en el año 2017.

El trabajo se basa en una serie de simulaciones numéricas empleando como software de cálculo FLAC3D para la determinación de tensiones y desplazamientos bajo distintas condiciones de sollicitación, así como para estimar las condiciones resistentes de la presa.

2. ANTECEDENTES

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

En este estudio se modelizó la geometría a partir de los planos del XYZT de 1991, tal y como se muestra en la Ilustración N° 1. En la Tabla N° 1 se resumen las propiedades materiales empleadas.

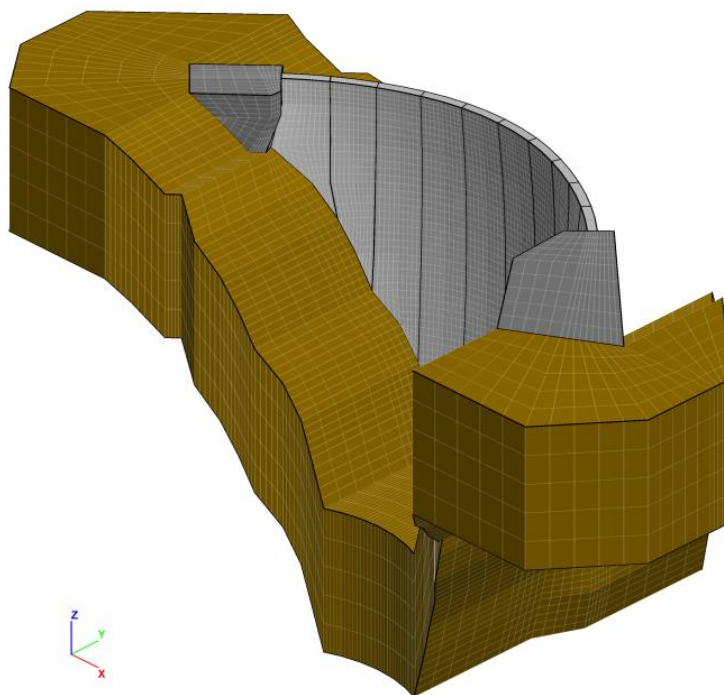


Ilustración N° 1. Geometría del modelo numérico estructural del estudio de 2017.

| | Módulo de Elasticidad [GPa] | Módulo de Poisson | Densidad [kg/m ³] |
|------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------------------|
| CUERPO DE PRESA | 31.1 | 0.2 | 2250 |
| TERRENO | 11.4 | 0.17 | 2200 |

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

Las principales conclusiones de este estudio son las siguientes:

- «La presa presenta un comportamiento frente a las hipótesis de solicitaciones analizadas que evidencian que el estado tensional resultante es compatible con márgenes de seguridad razonables, no comprometiendo la seguridad de la infraestructura para el rango de niveles entre el NMO y el NMN».
- «Es de gran importancia que se refinen los cálculos térmicos, incorporando al estudio datos reales del sitio de temperaturas ambientales y del agua embalsada correlacionados temporalmente, para poder establecer correctamente el comportamiento de la bóveda frente a dichas cargas térmicas».
- «Existe adicionalmente, una incertidumbre en la geometría real de la presa, pues los modelos se han realizado simplificadaamente según las geometrías del diseño de la presa y tras la visita quedó constancia que la geometría real dista ligeramente de la de proyecto, sobre todo en lo concerniente al paramento de aguas arriba».

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° 2), 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° 2, se muestra el elemento tipo «brick» con detalle de la numeración de sus nudos y sus caras.

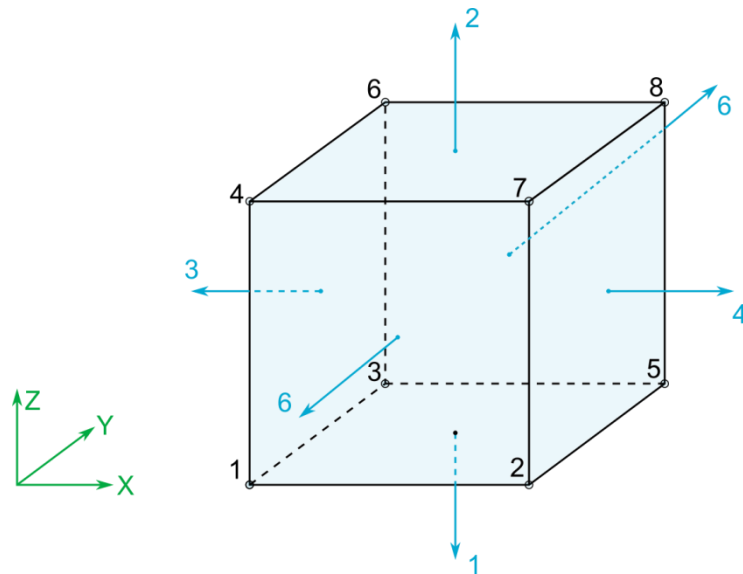


Ilustración Nº 2. Elemento primitivo tipo «brick» con detalle de sus nodos y caras.

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° 3, se muestra una vista cenital y una perspectiva de la nube de puntos empleada como base.

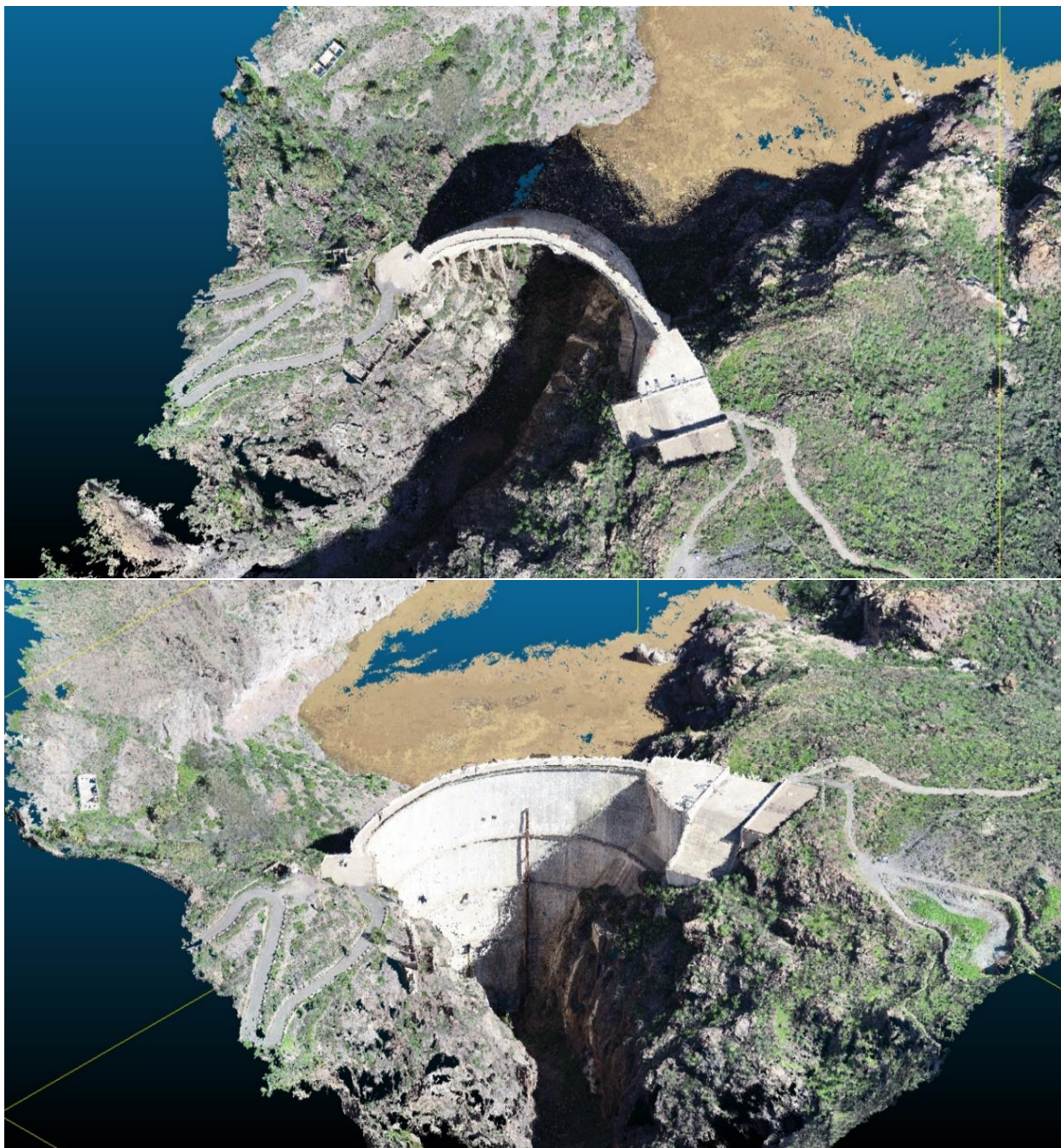


Ilustración N° 3. Nube de puntos obtenida por el vuelo del dron en la presa de Soria.

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 del cimiento de la presa.

Con esta definición geométrica se ha definido la geometría tridimensional de la presa.

4.1.1. Modelo tridimensional (M3D)

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. También se ha modelizado el estrato sedimentario presente en la margen derecha de forma simplificada.

Respecto a las condiciones de contorno, el modelo de diferencias finitas consta de 45 395 elementos y 28 328 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° 4. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo.
- Ilustración N° 5. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba.
- Ilustración N° 6. Vista en planta del modelo 3D completo.
- Ilustración N° 7. Vista en perspectiva del Modelo 3D con sus interfaces.
- Ilustración N° 8. Vista en perspectiva del Modelo 3D con las condiciones de contorno.
- Ilustración N° 9. Vista en perspectiva del Modelo 3D con detalle de la presa.

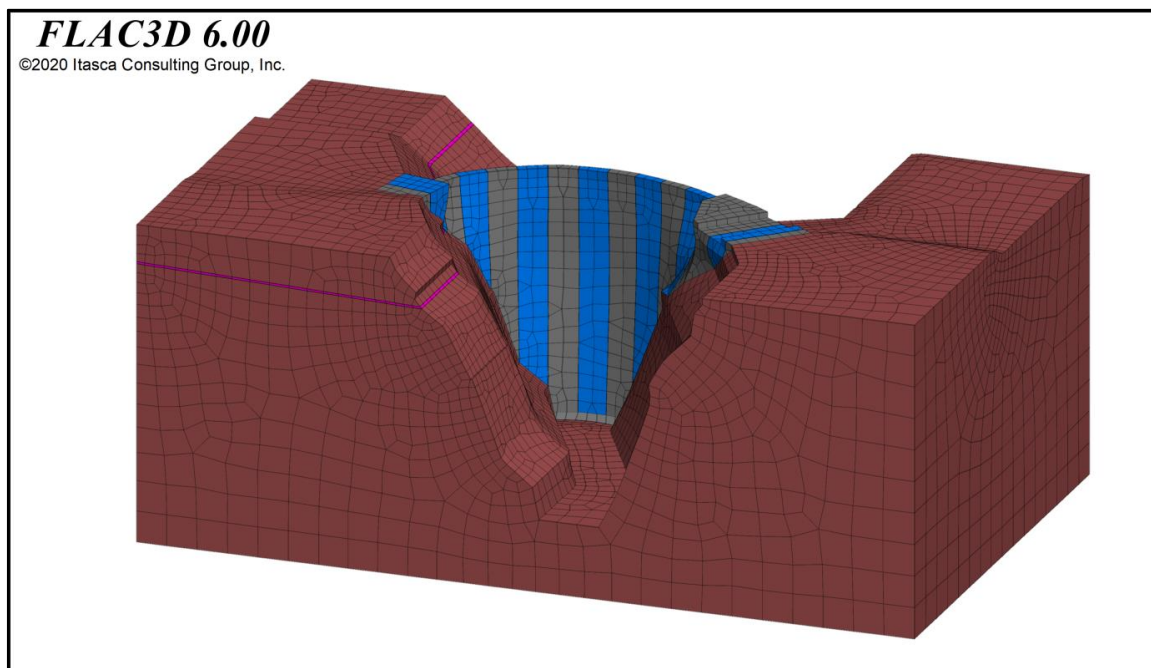


Ilustración N° 4. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo.

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

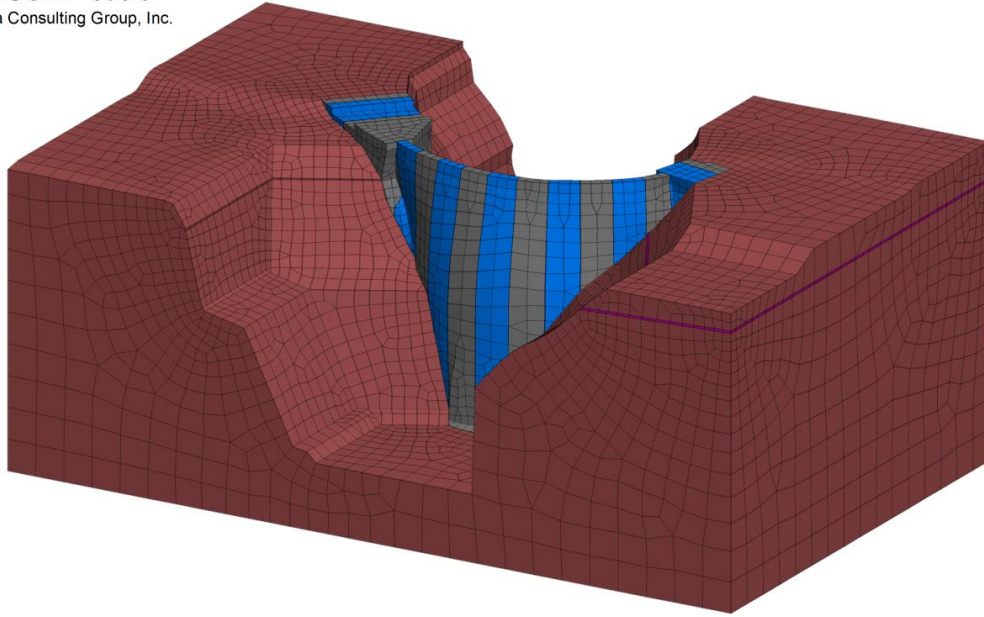


Ilustración N° 5. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba.

FLAC3D 6.00

©2020 Itasca Consulting Group, Inc.

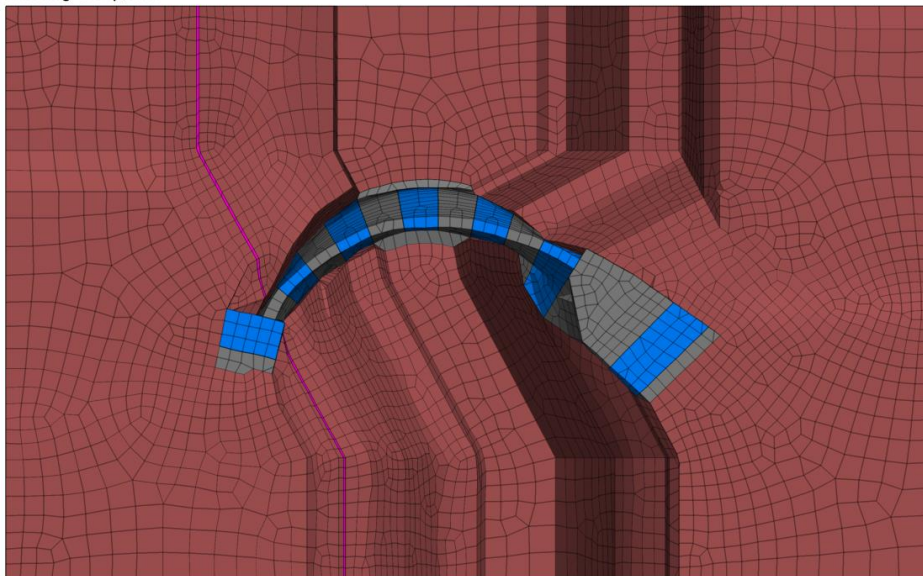


Ilustración N° 6. Vista en planta del modelo 3D completo.

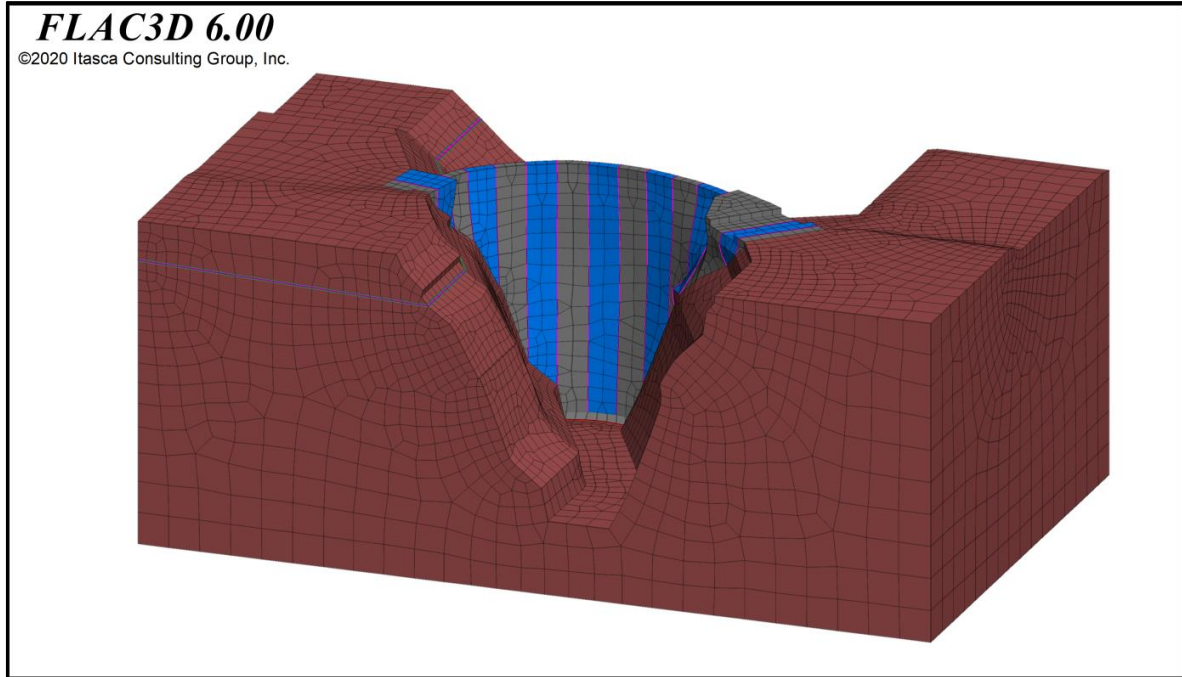


Ilustración N° 7. Vista en perspectiva del Modelo 3D con sus interfaces.

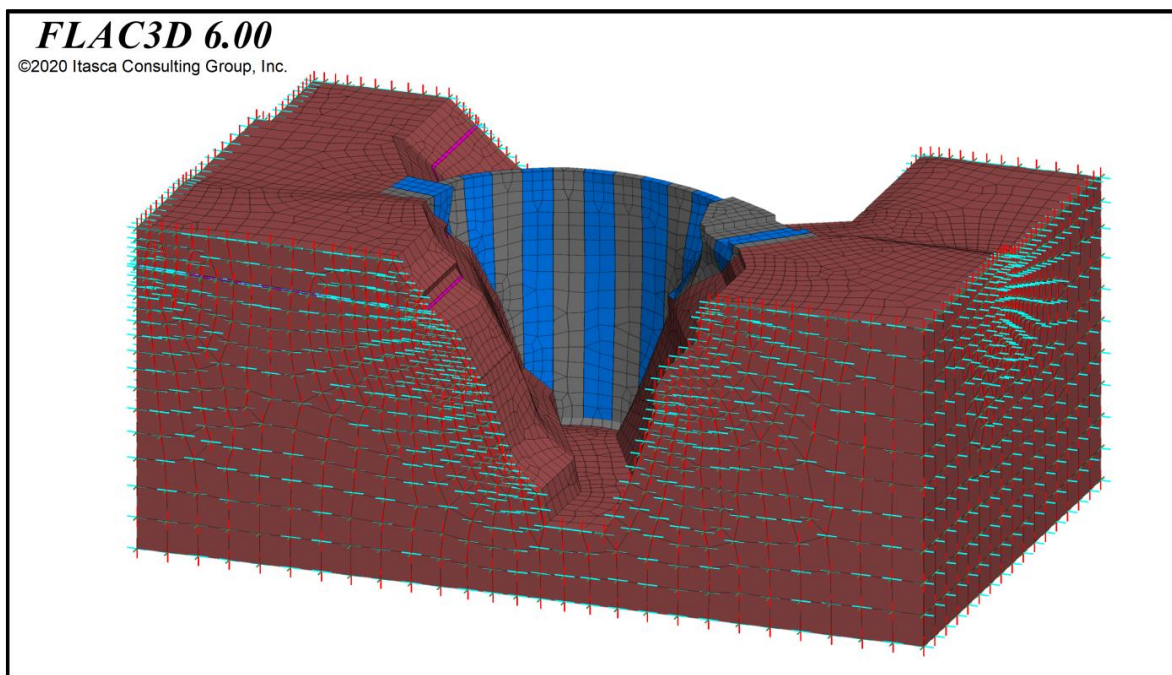


Ilustración N° 8. Vista en perspectiva del Modelo 3D con las condiciones de contorno.

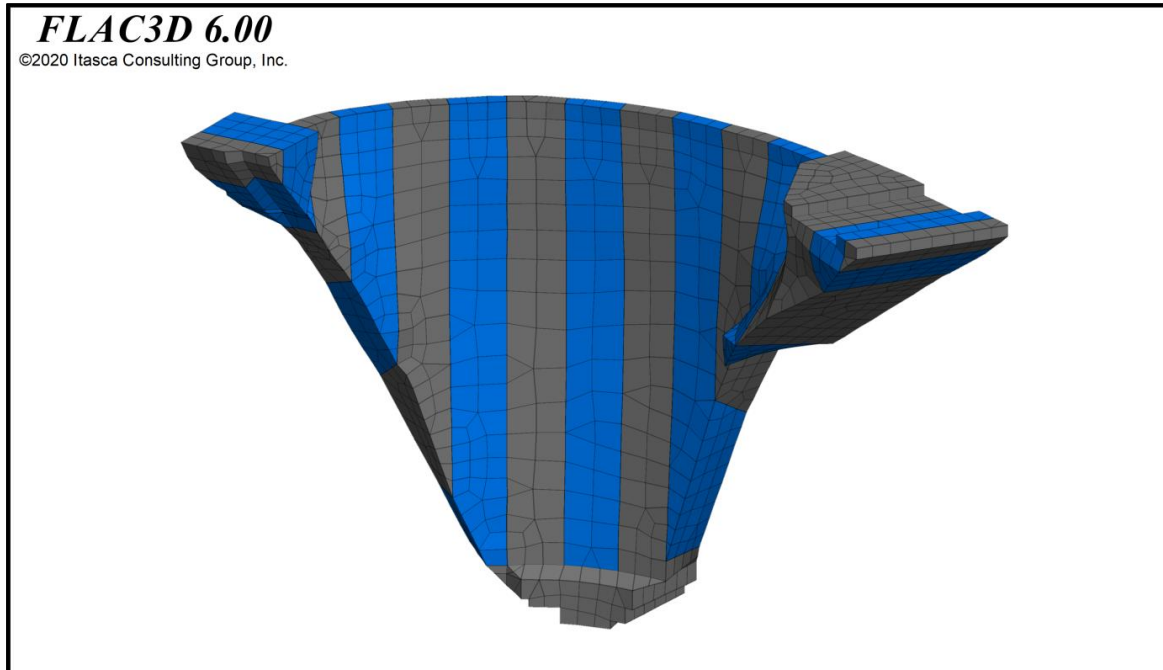


Ilustración Nº 9. Vista en perspectiva del Modelo 3D con detalle de la presa.

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.

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

Debido a que se trata de una presa bóveda, 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»¹ 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, δ_{ij} es el símbolo del delta de Kroenecker, y α_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, ν , mediante las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$$
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

¹ 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 σ_1 , σ_2 y σ_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 ϵ_1 , ϵ_2 y ϵ_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 α_1 y α_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 (σ_1, σ_3) como se observa en la Ilustración N° 2. 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 ϕ es el ángulo de fricción, c es la cohesión, σ^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 σ_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 ψ 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

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

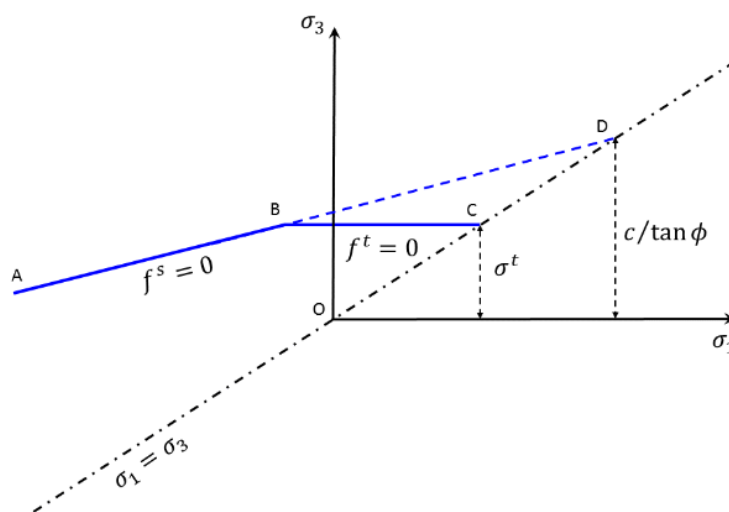


Ilustración N° 10. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb en FLAC3D².

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 (σ_1, σ_3) (Ilustración N° 11) 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° 11.

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 .

² ITASCA CONSULTING (2017). Manual de FLAC3D.

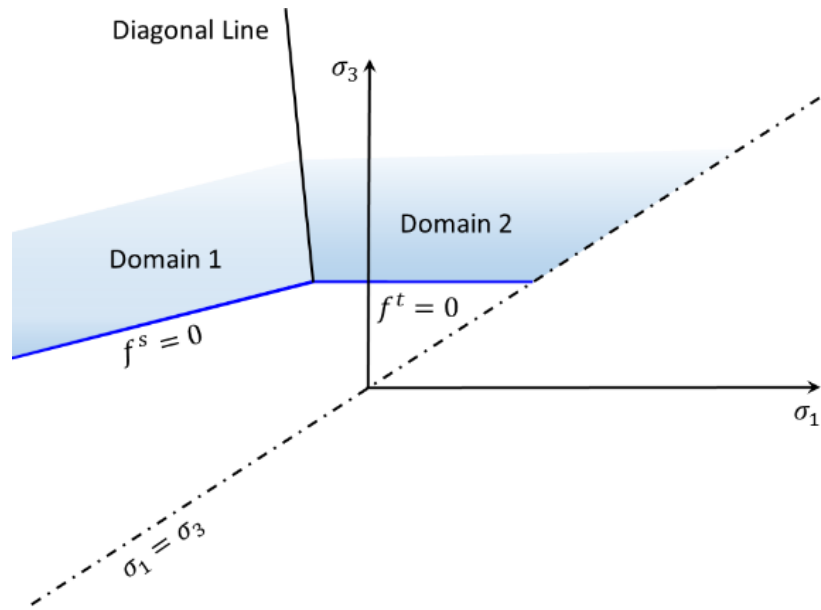


Ilustración N° 11. Dominios del modelo Mohr-Coulomb utilizados en la definición de la regla de flujo³

³ 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 embalses⁴. 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 2275 kg/m³ en base a lo empleado en modelos anteriores y en la campaña geotécnica de la presa de Soria.

⁴ 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:

- γ_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 USACE⁵, sobre las cuales se basa también las recomendaciones nacionales de la GT-2⁶.

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^o 12.

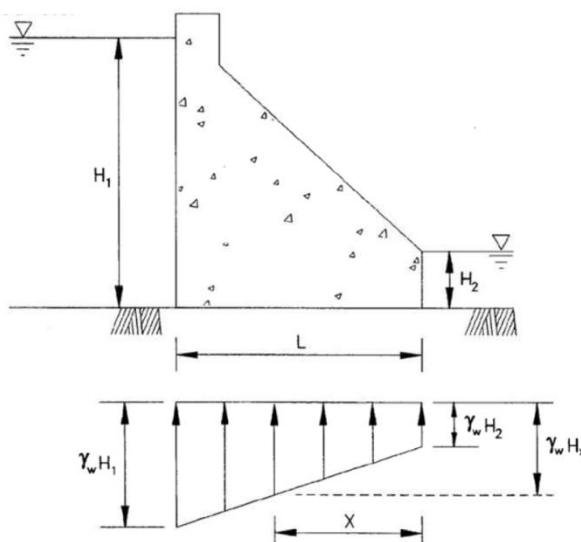


Ilustración N^o 12. Ley de subpresiones. Caso estático, sin pantalla de drenaje. Sin grieta bajo del pie de aguas arriba.

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

⁶ 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 se 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 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 2011/2012 pues en él se produce una variación asimilable a un año tipo. Adicionalmente y dado que el embalse no ha sido llenado hasta la fecha, se realiza una simulación de la onda térmica anual con el embalse a umbral de aliviadero.

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»⁷, 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 ADRASE⁸. Los valores de temperatura ambiente e incremento por radiación solar estimados son los mostrados en la Tabla N° 2.

| | OCT | NOV | DIC | ENE | FEB | MAR | ABR | MAY | JUN | JUL | AGO | SEP |
|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Nivel (m s.n.m.) | 575.0 | 574.4 | 573.9 | 573.6 | 572.8 | 571.9 | 570.9 | 569.8 | 568.7 | 567.5 | 566.3 | 564.8 |
| T. Ambiente (°C) | 19.1 | 16.7 | 14.6 | 13.4 | 13.6 | 14.7 | 15.2 | 16.3 | 18.2 | 20.3 | 21.3 | 20.9 |
| Radiación Solar (°C) | 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 N° 2. Nivel de embalse del año 2011/2012, temperatura ambiente e incremento por radiación solar para el emplazamiento de la presa de Soria.

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.

Para la estimación de las temperaturas del embalse, se emplea el modelo de Bofang⁹ por su simplicidad y por tener en cuenta la variación temporal y espacial de la temperatura del agua.

⁷ 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.

⁸ GRUPO DE RADIACIÓN SOLAR - CIEMAT (2012). Acceso a Datos de Radiación Solar en España (ADRASE). www.adrase.com

Las temperaturas obtenidas mediante este método, se muestran en la Ilustración N° 13. 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.

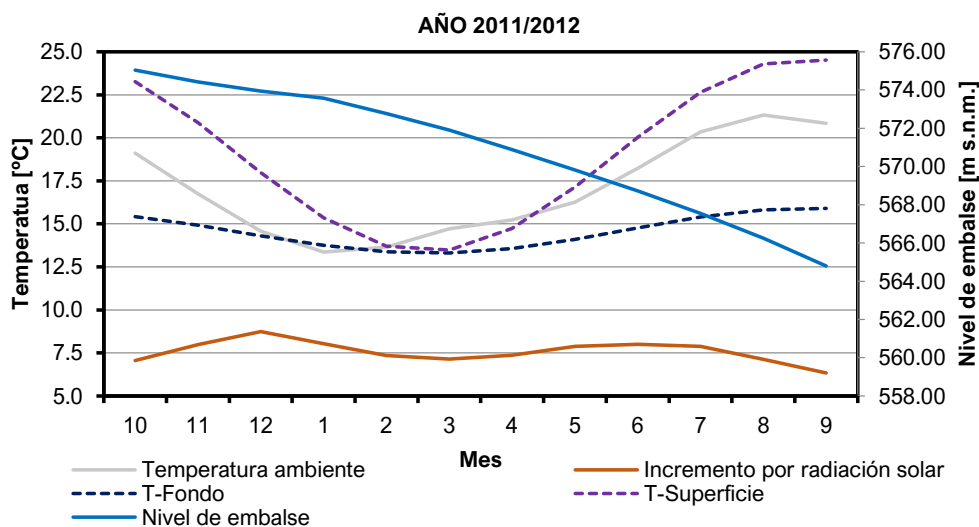


Ilustración N° 13. Evolución anual de las temperaturas y niveles en el embalse de Soria.

6.2. PARÁMETROS TENSO-DEFORMACIONALES DEL MODELO

Los parámetros resistentes y tenso-deformacionales adoptados para el modelo son los mostrados en la Tabla N° 3.

| | Presas | Cimiento | Contacto | Juntas |
|------------------------------------|----------|-------------|----------|--------|
| Material | Hormigón | Ignimbritas | - | - |
| Densidad [kg/m³] | 2275 | 2200 | - | - |
| Mod. Elasticidad [MPa] | 31100 | 11350 | - | - |
| Coef. Poisson | 0.20 | 0.17 | - | - |
| R. Tracción [MPa] | 1.60 | 2.70 | 0.50 | 1.20 |
| Cohesión [MPa] | 1.00 | 3.50 | 0.50 | 0.50 |
| Rozamiento [MPa] | 40.00 | 45.00 | 40.00 | 40.00 |

Tabla N° 3. Parámetros resistentes y tenso-deformacionales empleados en el modelo de la presa de Soria.

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

6.3. ESTRATEGIAS DE SIMULACIÓN

El objetivo de este trabajo es la evaluación tenso-deformacional y resistente de la presa de Soria, por ello se han definido dos 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.
- Análisis de sensibilidad.

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 (605.64 m s.n.m.) + subpresión.
- Embalse a cota de coronación (607.77 m s.n.m.) + subpresión.
- Embalse en umbral de aliviadero (605.64 m s.n.m.) + Onda Térmica Anual.

Todos estos escenarios se simulan empleando para ello la estimada de los parámetros resistentes y tenso-deformacionales.

Adicionalmente, se ha realizado una estimación del margen resistente incrementando la carga hidráulica hasta que se produzca un inicio de plastificación en el cuerpo de presa.

6.3.2. Análisis de sensibilidad

Adicionalmente a los análisis tenso-deformacionales, se realizarán simulaciones variando la rigidez del terreno para ver el efecto que se produce en la presa a efectos tenso-deformacionales, y también unas simulaciones variando la subpresión para estudiar el efecto que tendría una rehabilitación del sistema de drenaje.

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° 14, 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° 14 son todos positivos.

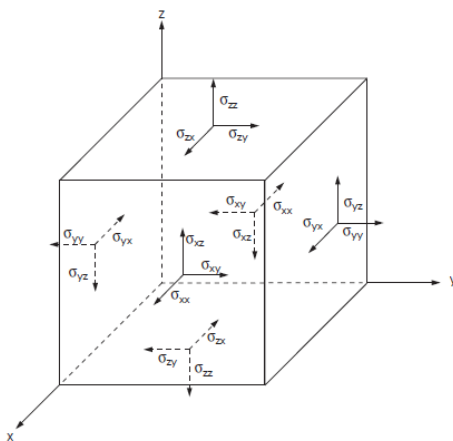


Ilustración N° 14. Criterio de signos para esfuerzos positivos.

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 **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** resume algunas terminologías usadas para denotar estrés y cómo se relacionan entre sí.

| | Negativo (-) | Positivo (+) | Intermedio |
|--------------------|--------------|--------------|------------|
| FLAC3D | Mínima | Máxima | Intermedia |
| Uso general | Mayor | Menor | Intermedia |
| Símbolo | σ_1 | σ_2 | σ_3 |

Tabla N° 4. 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

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. Sin juntas inyectadas

Este análisis parte de la situación en la que la presa está sometida únicamente a la acción de la gravedad y no se ha realizado la inyección de juntas. Esta hipótesis, si bien nunca es posible que se produzca pues siempre existe cierto gradiente térmico en la estructura y las juntas se inyectaron tal y como avanzaba la construcción, sirve como situación de comprobación del buen comportamiento del modelo.

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

- Ilustración N° 15. Embalse vacío. Juntas sin inyectar. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración N° 16. Embalse vacío. Juntas sin inyectar. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración N° 17. Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Desplazamientos.
- Ilustración N° 18. Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Tensor de tensiones
- Tabla N° 5. Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Resumen de los resultados.

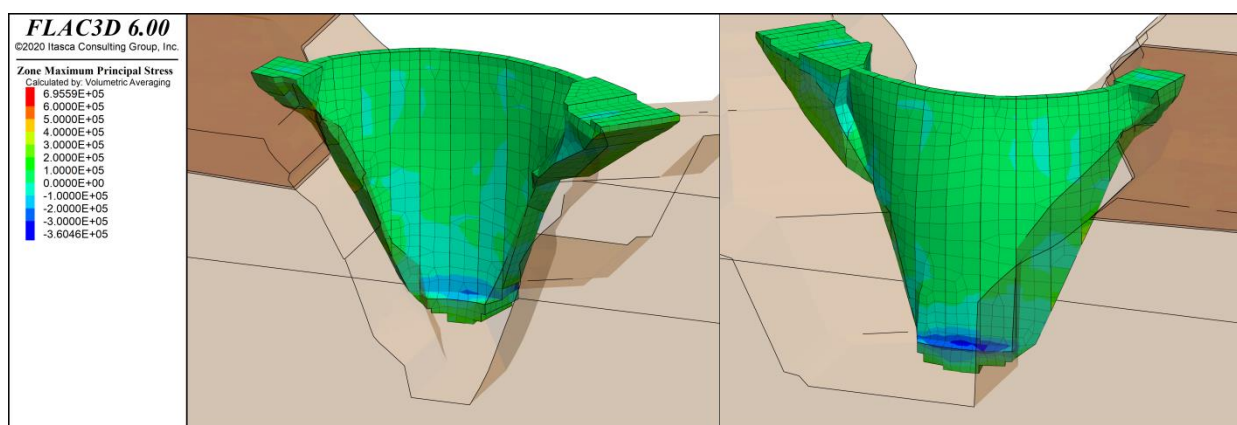


Ilustración N° 15. Embalse vacío. Juntas sin inyectar. Tensiones Principales máximas.

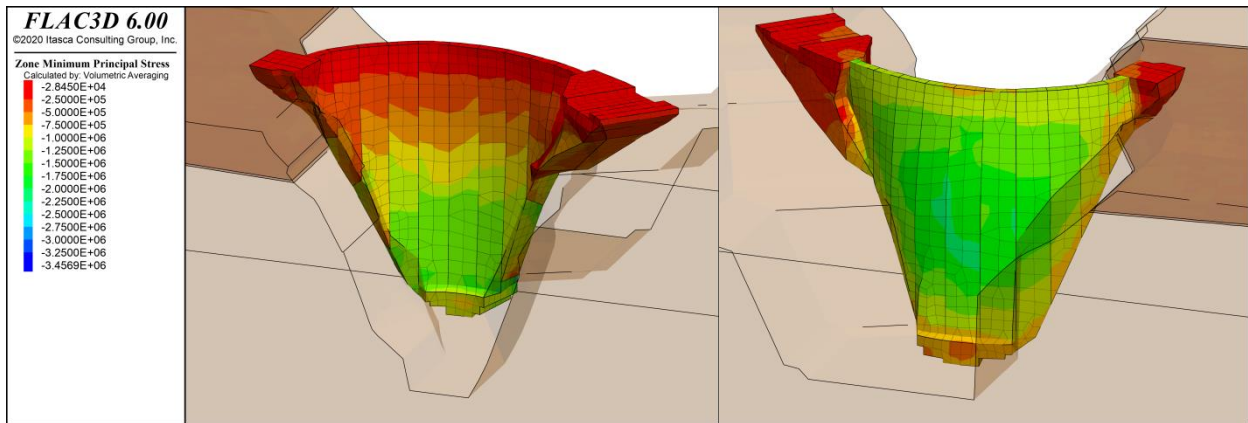


Ilustración N° 16. Embalse vacío. Juntas sin inyectar. Tensiones Principales mínimas.

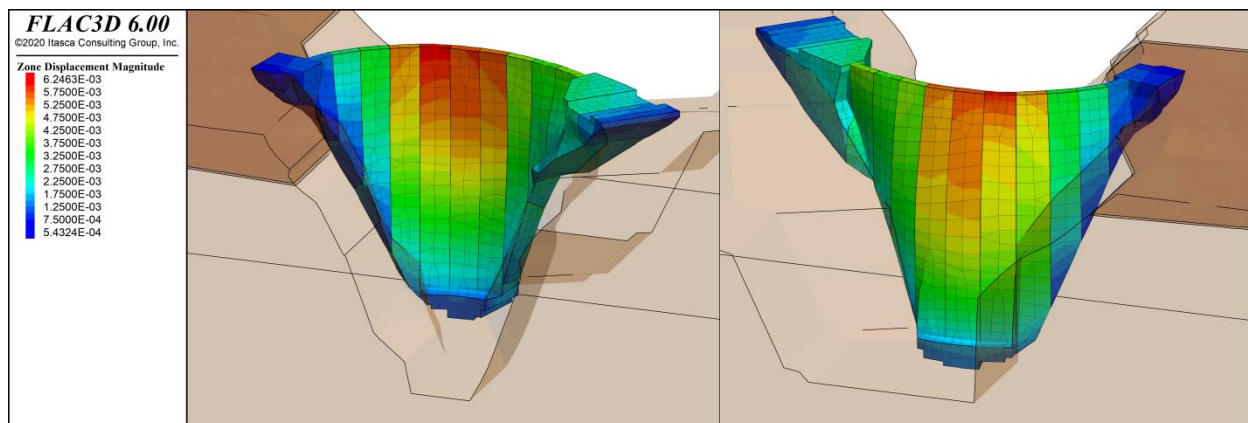


Ilustración N° 17. Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Desplazamientos.

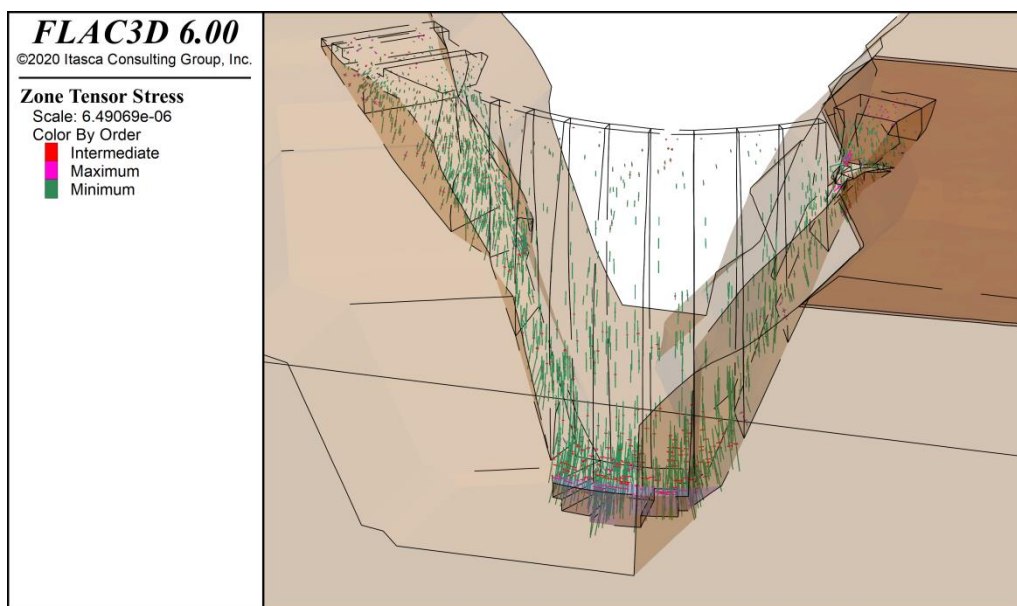


Ilustración N° 18. Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Tensor de tensiones

| EMBALSE VACÍO. JUNTAS SIN INYECTAR | |
|--|----------------|
| | Presa Completa |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 0.696 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 3.457 |
| Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | - |
| Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 5.12 |
| Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m) | 2.5E-03 |
| Máximo desplazamiento vertical en coronación (m) | -5.9E-03 |

Tabla Nº 5. Embalse Vacío. Juntas sin inyectar. Resumen de los resultados.

7.2.2. Embalse vacío. Juntas inyectadas

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

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

- Ilustración Nº 19. Embalse vacío. Juntas inyectadas. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración Nº 20. Embalse vacío. Juntas inyectadas. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración Nº 21. Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Desplazamientos.

0.

- Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Tensor de tensiones
- Tabla Nº 6. Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Resumen de los resultados.

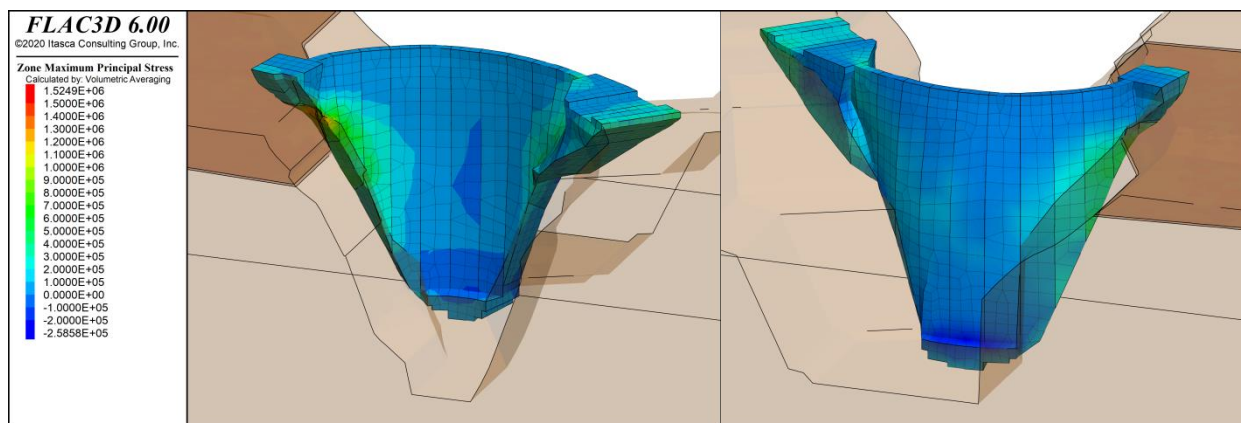


Ilustración Nº 19. Embalse vacío. Juntas inyectadas. Tensiones Principales máximas.

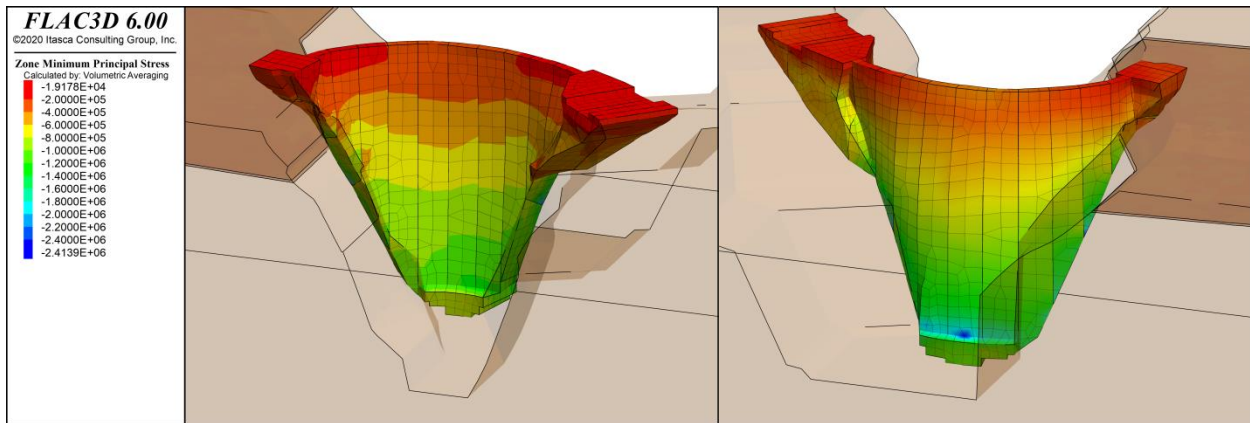


Ilustración Nº 20. Embalse vacío. Juntas inyectadas. Tensiones Principales mínimas.

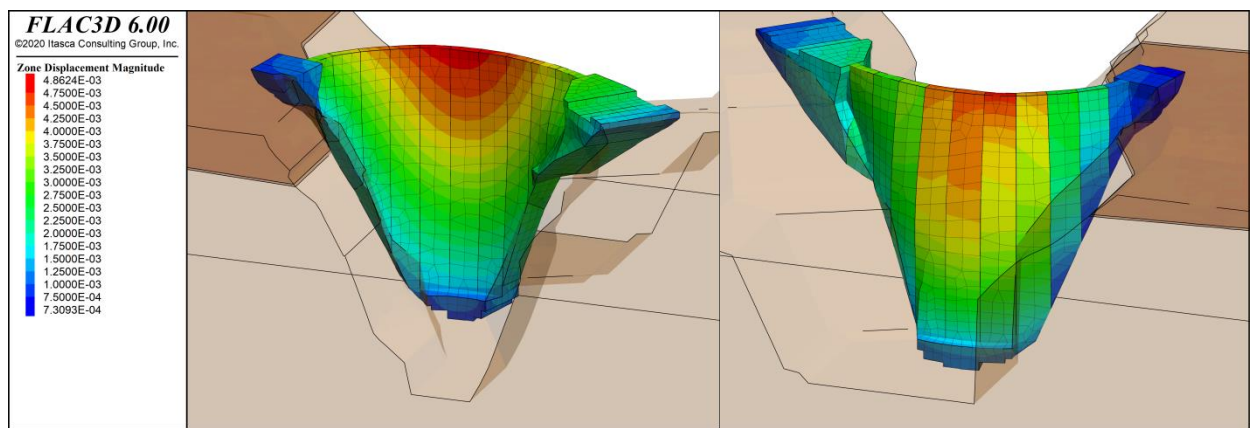


Ilustración Nº 21. Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Desplazamientos.

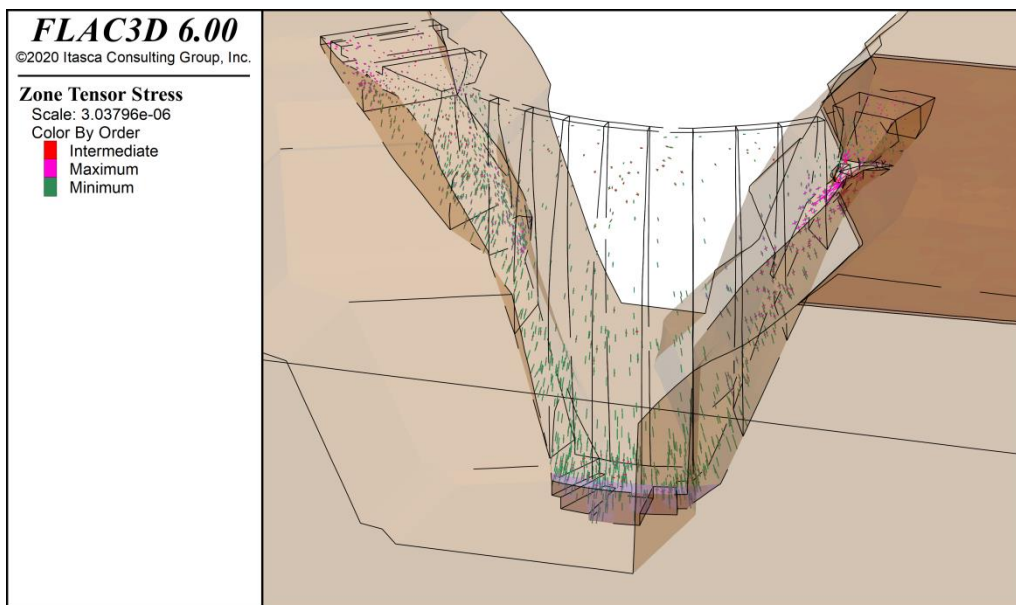


Ilustración Nº 22. Embalse Vacío. Juntas inyectadas. Tensor de tensiones

| EMBALSE VACÍO. JUNTAS INYECTADAS | |
|--|----------------|
| | Presa Completa |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 1.525 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 2.414 |
| Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | - |
| Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 1.63 |
| Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m) | 2.8E-03 |
| Máximo desplazamiento vertical en coronación (m) | -4.1E-03 |

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

7.2.3. Embalse en umbral de aliviadero (605.64 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 Soria con nivel de embalse a umbral del aliviadero y actuando la subpresión:

- Ilustración Nº 23. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración Nº 24. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración Nº 25. Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos.
- Ilustración Nº 26. Embalse a umbral del aliviadero. Tensor de tensiones
- Ilustración Nº 27. Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.
- Tabla Nº 7. Embalse a umbral del aliviadero. Resumen de los resultados.

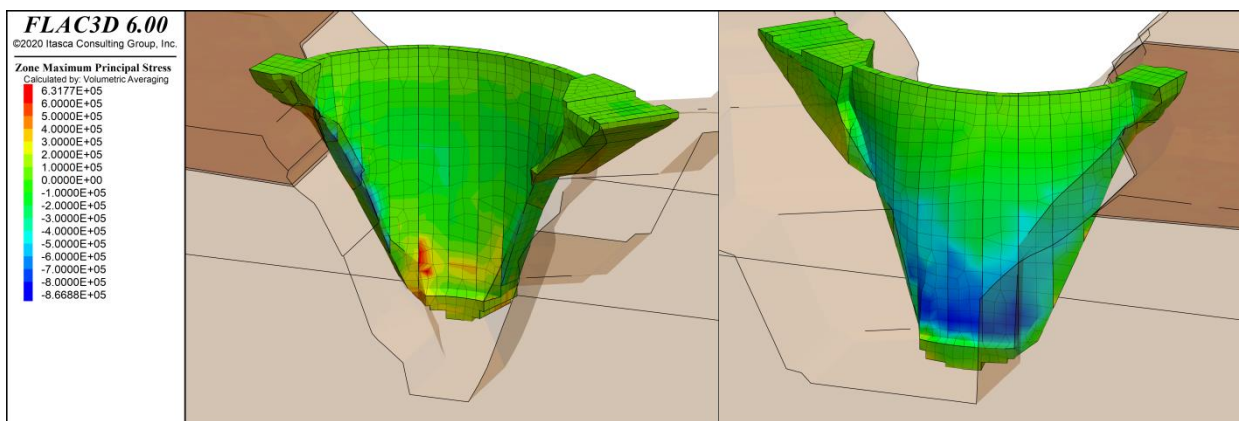


Ilustración Nº 23. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales máximas.

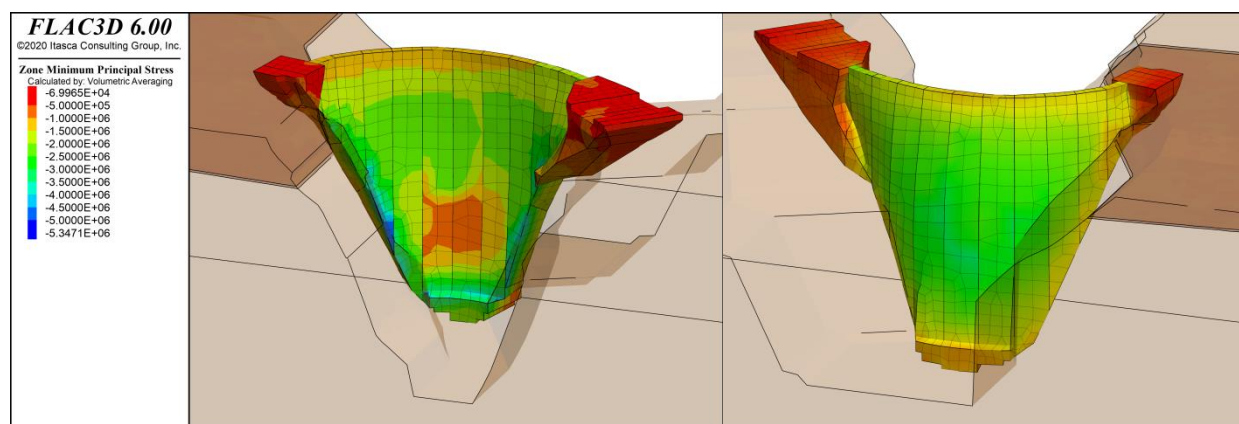


Ilustración Nº 24. Embalse a umbral del aliviadero. Tensiones Principales mínimas.

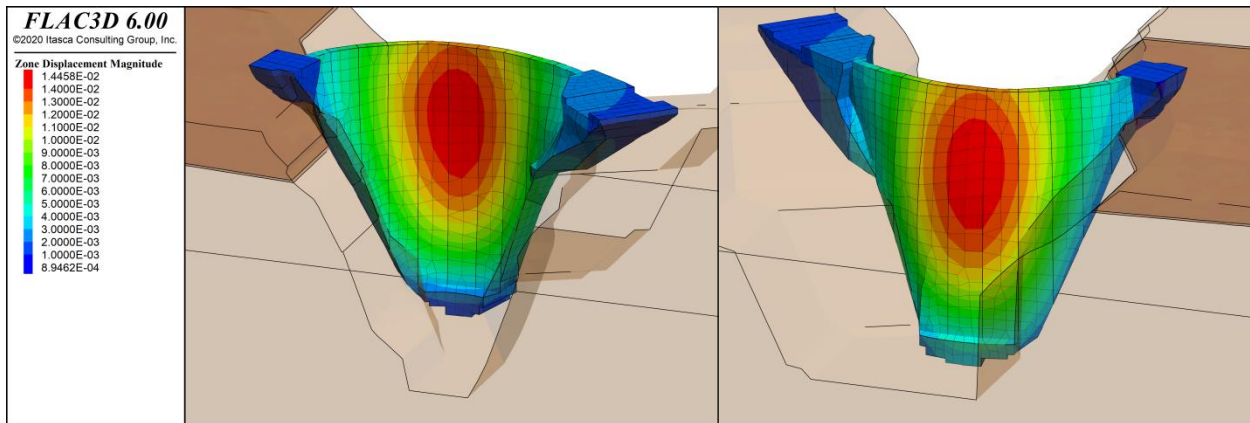


Ilustración Nº 25. Embalse a umbral del aliviadero. Desplazamientos.

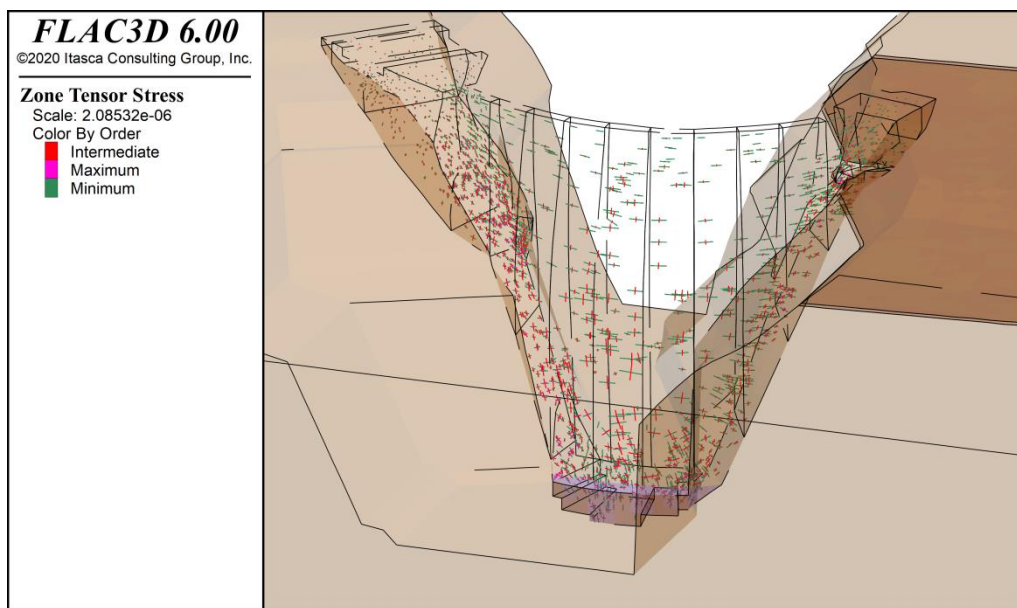


Ilustración Nº 26. Embalse a umbral del aliviadero. Tensor de tensiones

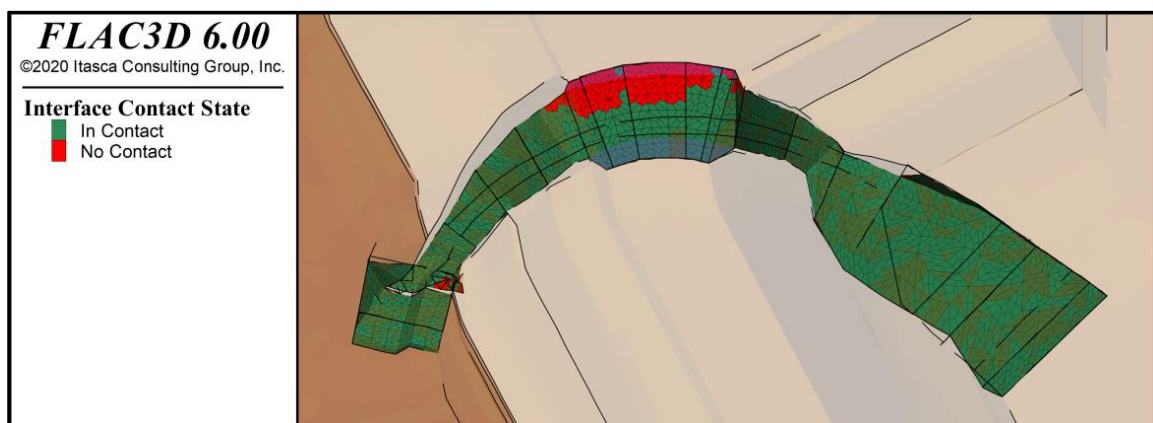


Ilustración Nº 27. Embalse a umbral del aliviadero. Estado del contacto presa-cimiento.

| EMBALSE A UMBRAL DE ALIVIADERO | |
|--|----------------|
| | Presa Completa |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 0.632 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 5.347 |
| Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 0.46 |
| Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 2.68 |
| Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m) | -1.1E-02 |
| Máximo desplazamiento vertical en coronación (m) | 2.2E-03 |

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

7.2.4. Embalse en nivel de coronación (607.77 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 Soria con nivel de embalse a la cota de coronación y actuando la subpresión:

- Ilustración Nº 28. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración Nº 29. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas.
- Ilustración Nº 30. Embalse a cota de coronación. Desplazamientos.
- Ilustración Nº 31. Embalse a cota de coronación. Tensor de tensiones
- Ilustración Nº 32. Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento.
- Tabla Nº 8. Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados.

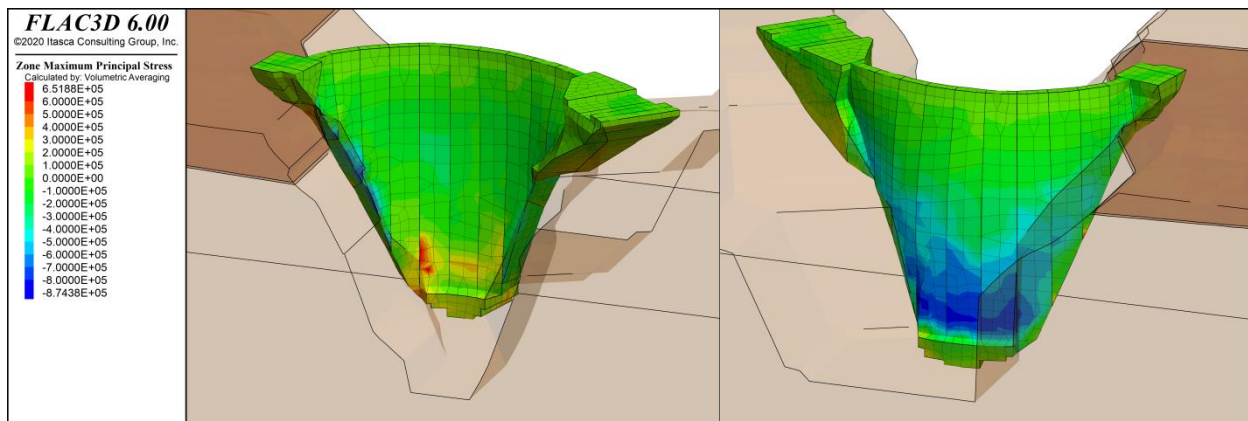


Ilustración Nº 28. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales máximas.

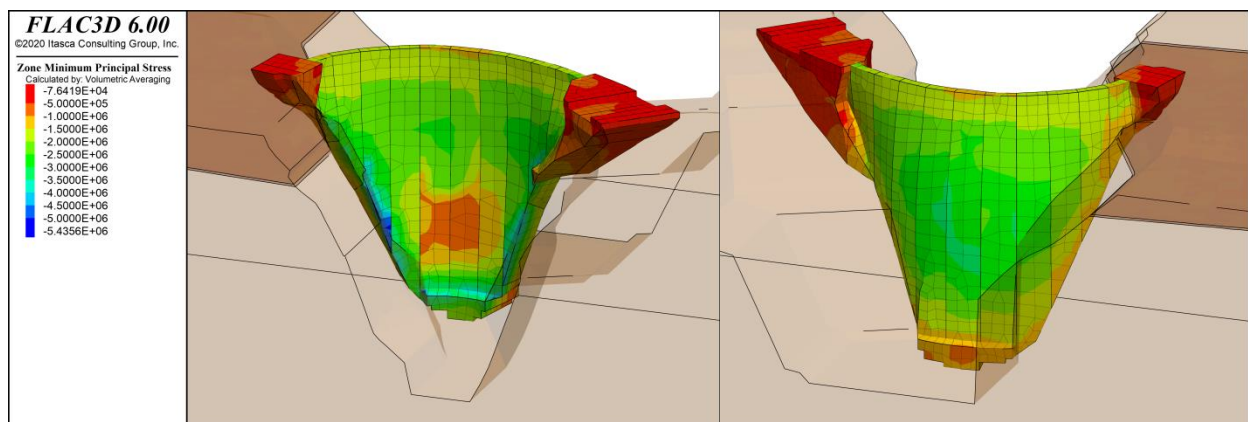


Ilustración Nº 29. Embalse a cota de coronación. Tensiones Principales mínimas.

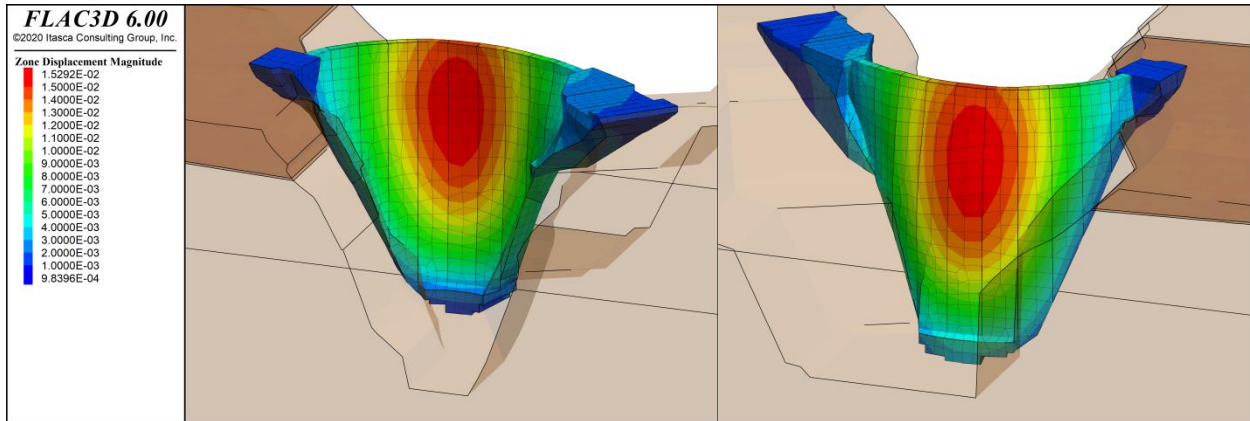


Ilustración N° 30. Embalse a cota de coronación. Desplazamientos.

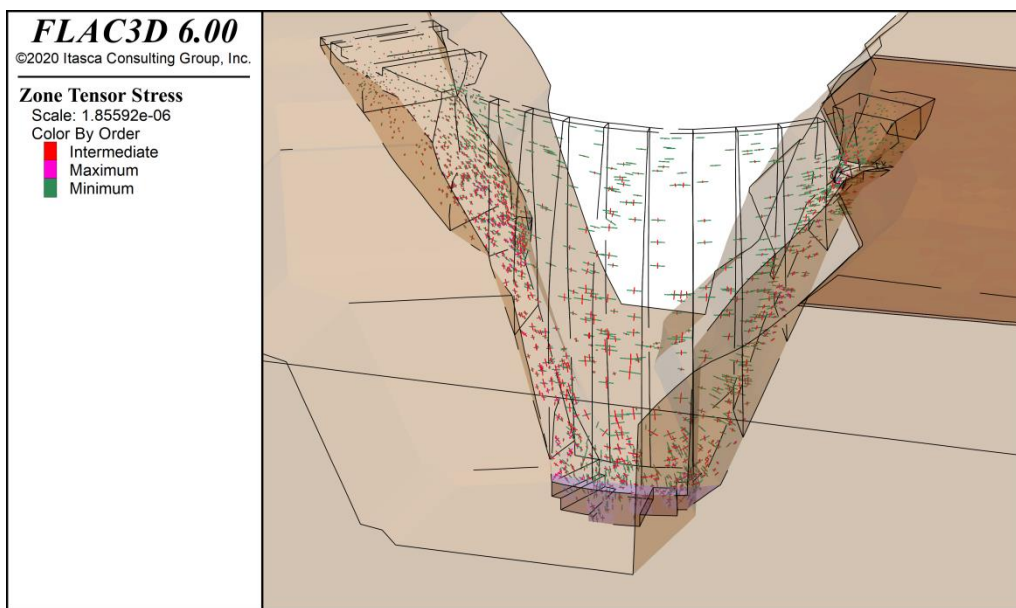


Ilustración N° 31. Embalse a cota de coronación. Tensor de tensiones

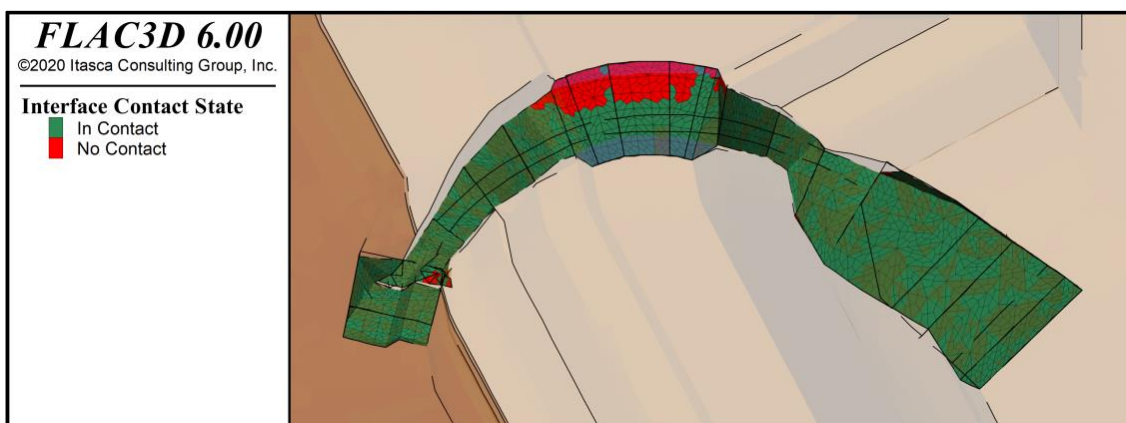


Ilustración N° 32. Embalse a cota de coronación. Estado del contacto presa-cimiento.

| EMBALSE A COTA DE CORONACIÓN | |
|--|----------------|
| | Presa Completa |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 0.652 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 5.436 |
| Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 0.44 |
| Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 2.72 |
| Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m) | -1.4E-02 |
| Máximo desplazamiento vertical en coronación (m) | 2.3E-03 |

Tabla Nº 8. Embalse a cota de coronación. Resumen de los resultados.

7.2.5. Simulación Térmica Anual

Este análisis realiza una simulación de un ciclo de embalse anual con la aplicación de temperatura mes a mes. A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Soria con esta simulación:

- Ilustración Nº 33. Simulación térmica anual. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración Nº 34. Simulación térmica anual. Tensiones Principales mínimas.
- Tabla Nº 9. Simulación térmica anual. Resumen de los resultados.

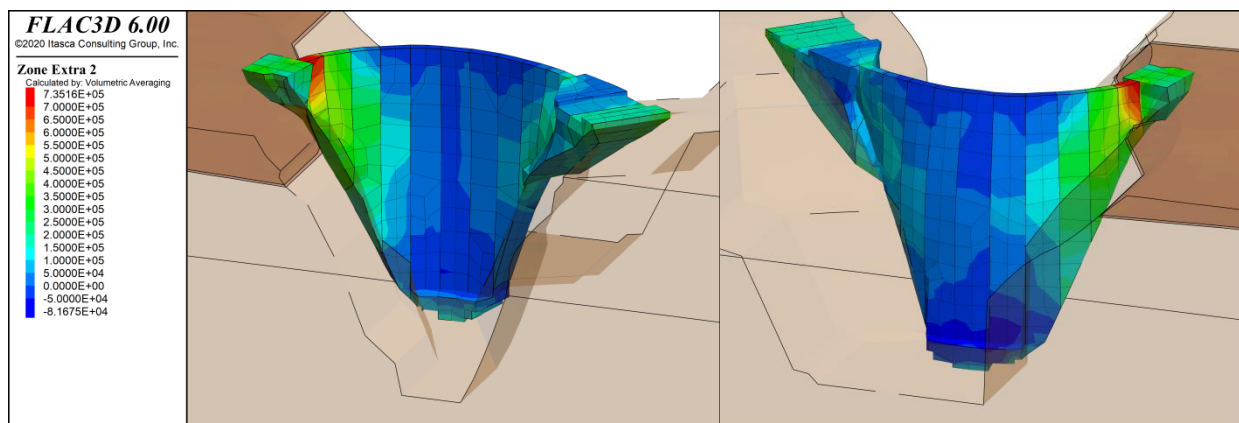


Ilustración Nº 33. Simulación térmica anual. Tensiones Principales máximas.

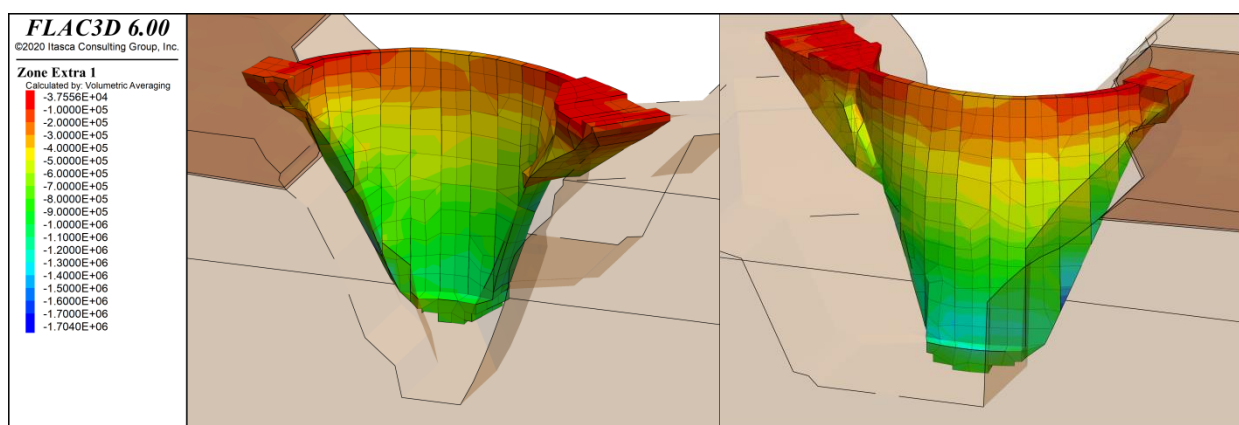


Ilustración Nº 34. Simulación térmica anual. Tensiones Principales mínimas.

| SIMULACIÓN TÉRMICA ANUAL | |
|---|----------------|
| Hipótesis | Presa Completa |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 0.735 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 1.700 |

Tabla Nº 9. Simulación térmica anual. Resumen de los resultados.

7.2.6. Embalse en umbral de aliviadero (605.64 m s.n.m.) + Onda Térmica Anual

Este análisis realiza una simulación de un ciclo de temperaturas anual con la aplicación de temperatura mes a mes y manteniendo el embalse lleno hasta la cota 605.87 m s.n.m. A continuación, se presentan los principales resultados de la modelización de la presa de Soria con esta simulación:

- Ilustración Nº 35. Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Tensiones Principales máximas.
- Ilustración Nº 36. Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Tensiones Principales mínimas.
- Tabla Nº 10. Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Resumen de los resultados.

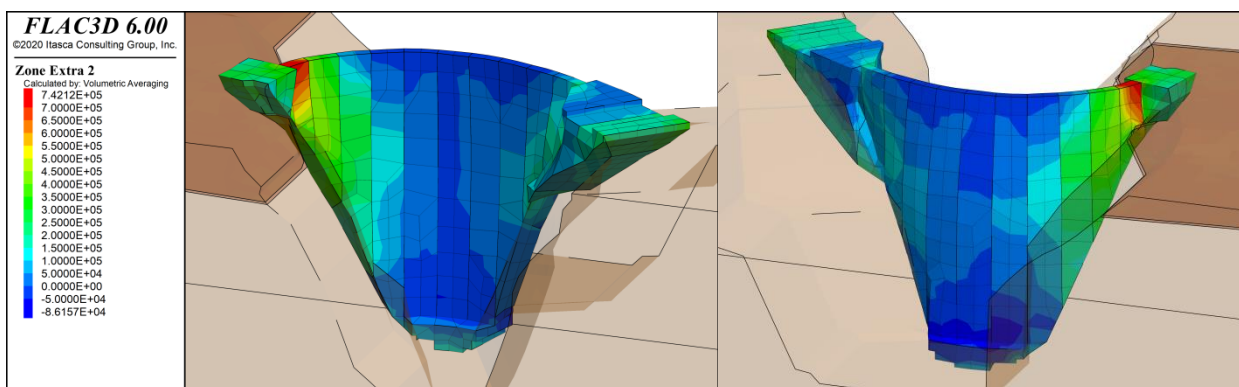


Ilustración Nº 35. Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Tensiones Principales máximas.

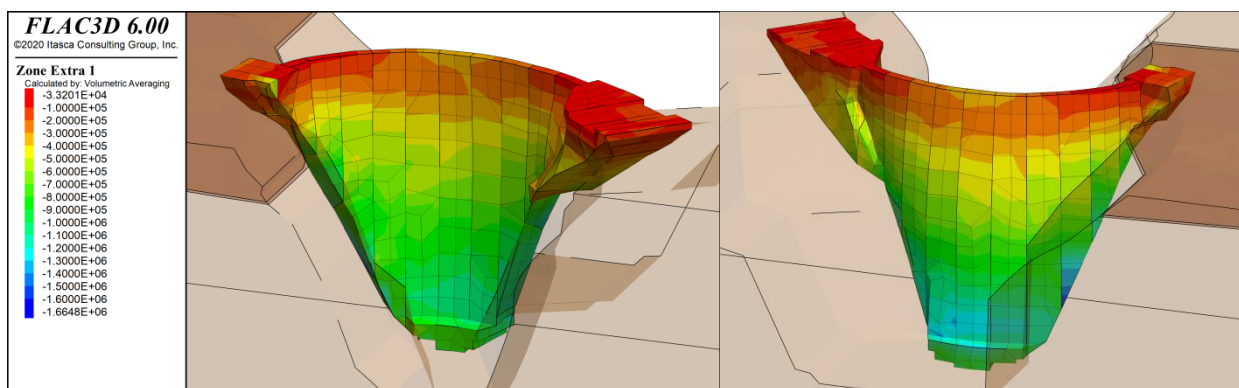


Ilustración Nº 36. Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Tensiones Principales mínimas.

| SIMULACIÓN TÉRMICA ANUAL A UMBRAL DE ALIVIADERO | |
|---|----------------|
| Hipótesis | Presa Completa |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 0.742 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 1.665 |

Tabla Nº 10. Embalse a umbral de aliviadero y onda térmica. Resumen de los resultados.

7.3. ESTIMACIÓN DEL MARGEN RESISTENTE

La estimación del margen resistente de la presa se plantea incrementando el nivel de embalse en intervalos de 5 metros partiendo desde la cota 610.00 m s.n.m. (2.23 m sobre coronación) hasta identificar una posible zona plastificada de la estructura.

Simulando con los parámetros mostrados en la Tabla N° 3, se inicia una plastificación significativa a partir de la cota 635.00 m s.n.m., es decir, con un incremento de la carga hidráulica de un 45%.

Además, y con el objetivo de capturar el posible efecto que las cargas cíclicas pueden tener en la estructura, se ha repetido la simulación con una resistencia a tracción del hormigón del 70% de la considerada como mejor estimada según se indica en el Eurocódigo N° 2¹⁰. Con ello, las simulaciones se realizan con una resistencia a tracción del hormigón de 1.12 MPa. En este caso, se inicia la plastificación significativa a partir de la cota 625.00 m s.n.m., es decir, con un incremento de la carga hidráulica respecto a coronación de un 28%.

7.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

7.4.1. Variación del módulo de elasticidad del terreno

El análisis de sensibilidad realizado, se enfoca en determinar qué efectos tensionales y en el campo de desplazamientos presenta contar con una roca con un módulo de elasticidad distinto al considerado como caso base. Para ello se realizan las simulaciones a peso propio, umbral del aliviadero y cota de coronación para módulos de elasticidad del macizo de 15 GPa y 20 GPa. En las Tabla N° 11, Tabla N° 12 y Tabla N° 13, se muestran los resultados para embalse vacío, embalse a umbral del aliviadero y embalse en coronación, respectivamente.

| EMBALSE VACÍO. JUNTAS INYECTADAS | | | |
|--|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | $E_R = 11.35 \text{ GPa}$ | $E_R = 15 \text{ GPa}$ | $E_R = 20 \text{ GPa}$ |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 1.525 | 1.345 | 1.182 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 2.414 | 2.269 | 2.138 |
| Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | - | - | - |
| Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 1.63 | 1.63 | 1.63 |
| Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m) | 2.8E-03 | 2.6E-03 | 2.4E-03 |
| Máximo desplazamiento vertical en coronación (m) | -4.1E-03 | -3.7E-03 | -3.3E+03 |

Tabla N° 11. Análisis de sensibilidad. Embalse vacío.

| EMBALSE A UMBRAL DE ALIVIADERO | | | |
|--|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | $E_R = 11.35 \text{ GPa}$ | $E_R = 15 \text{ GPa}$ | $E_R = 20 \text{ GPa}$ |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 0.632 | 0.602 | 0.727 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 5.347 | 5.213 | 5.223 |
| Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 0.456 | 0.456 | 0.456 |
| Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 2.68 | 2.68 | 2.68 |
| Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m) | -1.1E-02 | -1.1E-02 | -1.1E-02 |
| Máximo desplazamiento vertical en coronación (m) | 2.2E-03 | 2.0E-03 | 1.9E-03 |

Tabla N° 12. Análisis de sensibilidad. Embalse a umbral del aliviadero.

¹⁰ Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN1192-1-1.2013

| EMBALSE A COTA DE CORONACIÓN | | | |
|--|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | $E_R = 11.35 \text{ GPa}$ | $E_R = 15 \text{ GPa}$ | $E_R = 20 \text{ GPa}$ |
| Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa) | 0.652 | 0.737 | 0.768 |
| Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa) | 5.436 | 5.313 | 5.372 |
| Máxima Tracción Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 0.444 | 0.444 | 0.444 |
| Máxima Compresión Vertical en el contacto presa-cimiento (MPa) | 2.72 | 2.72 | 2.72 |
| Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m) | -1.4E-02 | -1.3E-02 | -1.3E-02 |
| Máximo desplazamiento vertical en coronación (m) | 2.3E-03 | 2.0E-03 | 1.9E-03 |

Tabla Nº 13. Análisis de sensibilidad. Embalse a cota de coronación.

7.4.2. Hipótesis de subpresión

El análisis de sensibilidad realizado, se enfoca en estudiar el efecto de la subpresión en el estado tensional del contacto entre la presa y el cimiento. Para ello se han realizado las simulaciones con un nivel de embalse al umbral del aliviadero con varios supuestos:

- No existe subpresión en el contacto presa-cimiento.
- La subpresión en el contacto es de 1/3 de la subpresión con drenes ineficaces.
- La subpresión en el contacto es de 2/3 de la subpresión con drenes ineficaces.

A continuación, en las Ilustración Nº 37, Ilustración Nº 38, Ilustración Nº 39, se muestra el estado del contacto para los tres escenarios descritos anteriormente, el equivalente con drenes ineficaces se muestra en la Ilustración Nº 27. Además, en la Ilustración Nº 40 se muestran las tensiones en el contacto para las 4 hipótesis.

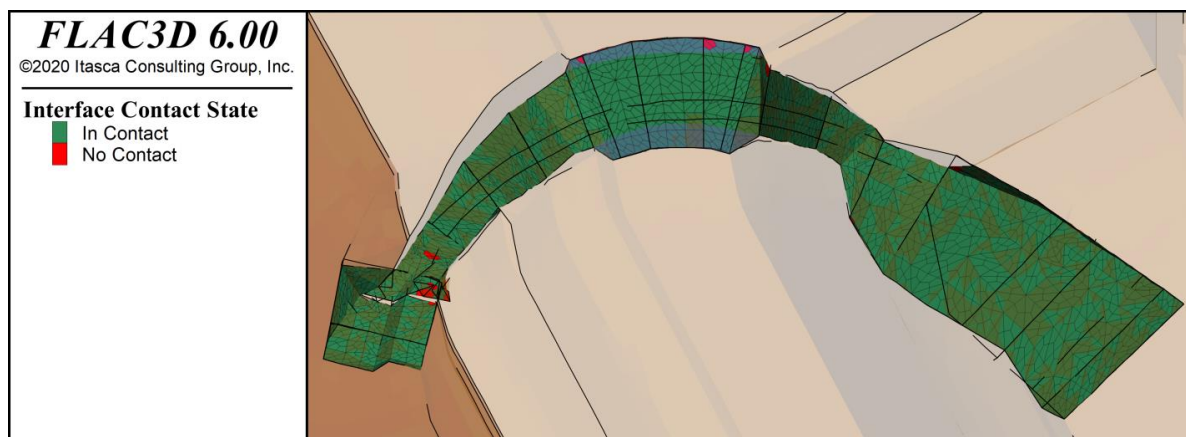


Ilustración Nº 37. Análisis de sensibilidad. Estado del contacto sin subpresión.

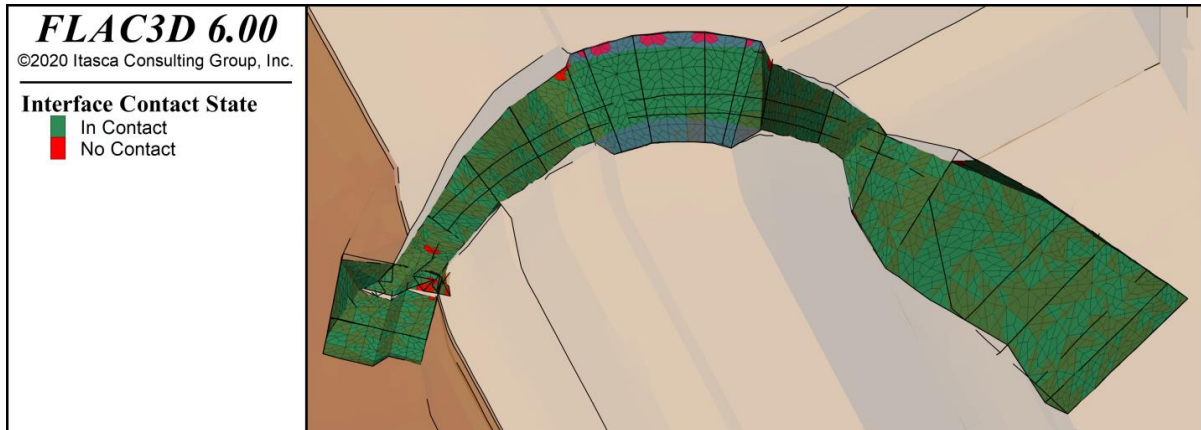


Ilustración N° 38. Análisis de sensibilidad. Estado del contacto con 1/3 de la subpresión con drenes ineficaces.

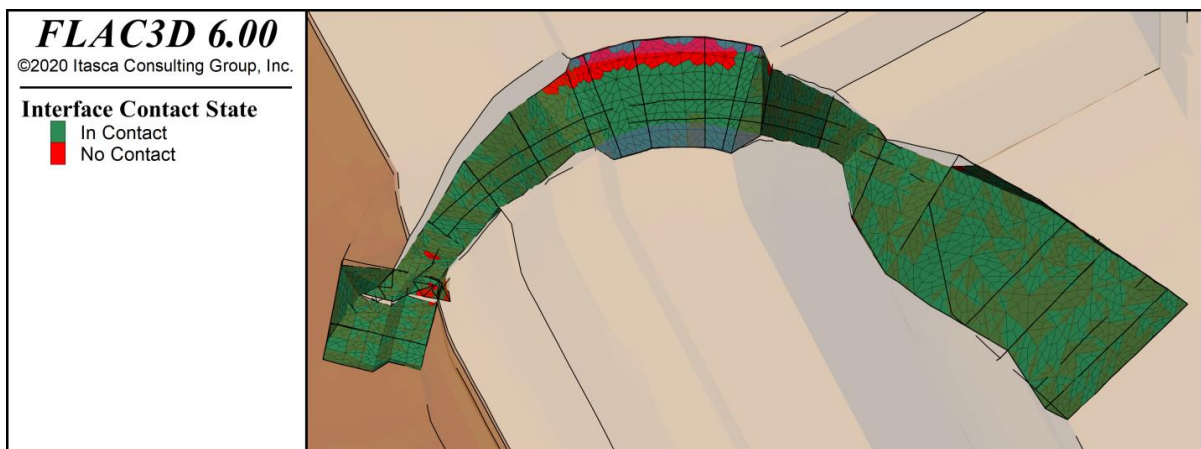


Ilustración N° 39. Análisis de sensibilidad. Estado del contacto con 2/3 de la subpresión con drenes ineficaces.

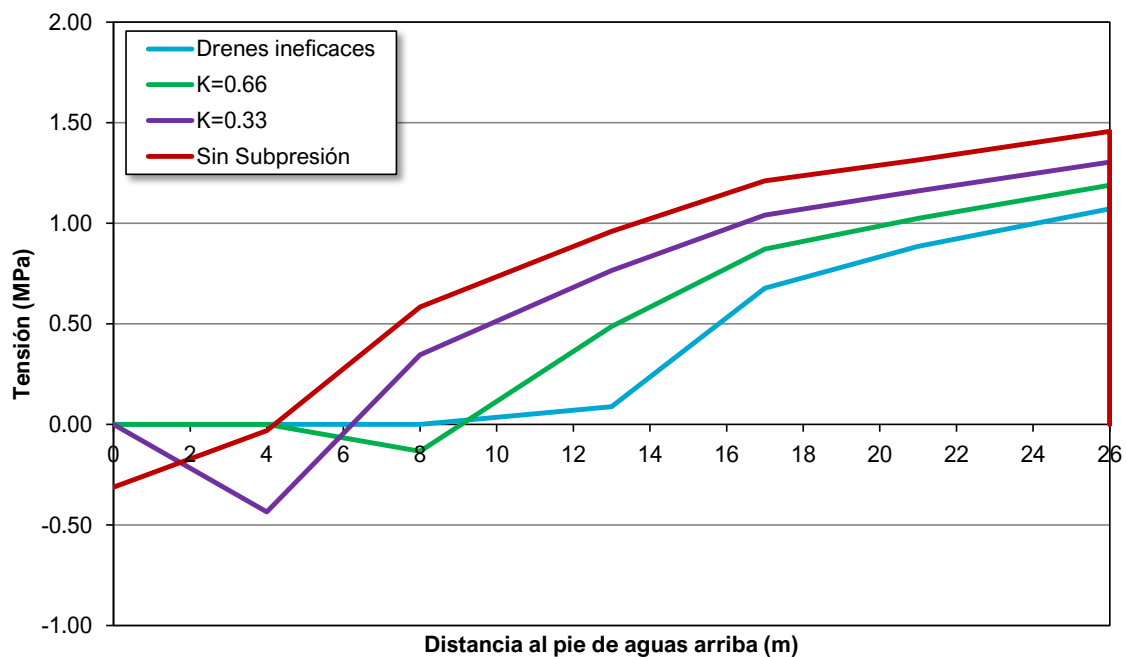


Ilustración N° 40. Análisis de sensibilidad. Tensiones en el contacto para las 4 hipótesis de subpresión consideradas.

8. CONCLUSIONES

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

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 Soria, 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. Un comportamiento estructural previsible dada la tipología de la presa, la calidad del hormigón y las idóneas condiciones geomorfológicas de la cerrada.

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