

CONSEJO INSULAR DE AGUAS DE GRAN CANARIA

iPresas Risk Analysis

Asistencia Técnica para la modelización numérica de las presas del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria

El Mulato

Junio de 2021

iPresas Risk Analysis
Avda. del Puerto, 180, 1ºB
46023 – Valencia
Tel.: (+34) 963 309 121
www.ipresas.com

ÍNDICE DEL DOCUMENTO

PARTE I. Antecedentes 9

1. Antecedentes de la presa e información disponible 11
   1.1. Objetivos y alcance 11
   1.2. Antecedentes 11
2. Visita técnica 15
3. Revisión altimétrica 22

PARTE II. Modelización y resultados 23

4. Software empleado en la modelización 25
   4.1. Tipo de elemento de cálculo 25
   4.2. Dimensiones de los elementos 26
5. Modelos geométricos considerados 27
   5.1. Definición geométrica de los modelos 27
   5.2. Modelos 2D 28
   5.3. Modelos 3D 30
6. Modelos constitutivos 35
   6.1. Modelo elástico e isótropo 35
   6.2. Modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb 35
7. Definición de acciones y estrategias de simulación 39
   7.1. Acciones 39
   7.2. Estrategias de simulación 42
8. Caracterización resistente y tenso-deformacional 45
   8.1. Caracterización de la cimentación 45
   8.2. Caracterización de la presa 47
   8.3. Caracterización del contacto 48
   8.4. Caracterización del contacto entre bloques 48
   8.5. Resumen de parámetros resistentes y tenso-deformacionales 48
9. Resultados 50
   9.1. Criterio de signos 50
   9.2. Análisis tenso-deformacional y resistente 51
   9.3. Aproximación al margen de seguridad resistente 54

PARTE III. Márgenes de seguridad, auscultación y conclusiones 63

10. Análisis de la estabilidad general 65
11. Propuesta de auscultación 67

12. Conclusiones 72

PARTE IV. Anejos 73

Anejo 1. Estaciones geomecánicas 75

Anejo 2. Resumen de sondeo y ensayos de referencia 113

Anejo 3. Resultados 117

Anejo 4. Manual de los modelos 163

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Efecto de la relación Ec/Em en el comportamiento de presas de gravedad según Rocha (Extraído de Romana)..... 43

Tabla 2. Ubicación de las estaciones geomecánicas en la presa de El Mulato..... 45

Tabla 3. Clasificación del macizo rocoso en relación al índice RMR en la presa de El Multo. 46

Tabla 4. Clasificación de la estabilidad de la presa en función del índice DMR en la presa de El Mulato..... 46

Tabla 5. Resumen de parámetros resistentes y tenso-deformacionales empleados en el modelo. 49

Tabla 6. Criterio de signos para tensiones principales. 50

Tabla 7. Embalse vacío. Resumen de los resultados..... 52

Tabla 8. Embalse en coronación (N 741.30 m s.n.m.) + subpresión. Resumen de los resultados. 54

Tabla 9. Casos planteados para el Escenario 1: Variación de la cohesión, fricción y tracción..... 54

Tabla 10. Casos planteados para el Escenario 2: Incremento progresivo del nivel de embalse. 56

Tabla 11. Casos planteados para el Escenario 3: Rigidez relativa presa-cimiento. 58

Tabla 12. Coeficientes de seguridad frente a la estabilidad general. 65

Tabla 13. Coeficientes de seguridad frente a la estabilidad general drenaje rehabilitado 66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sección tipo presa El Mulato. 12

Figura 2. Sección tipo de la presa de El Mulato según el proyecto de 1949. 13

Figura 3. Planta y sección de la presa de El Mulato. Documento XYZT 1994. 14

Figura 4. Localización del "portfolio" de presas explotado por el Consejo Insular de Gran Canaria. 15

Figura 5. Vista del paramento de aguas arriba y del vaso del embalse. 17

Figura 6. Vista de la coronación y paramento de aguas abajo. 17

Figura 7. Aspecto de la galería superior. 18

Figura 8. Péndulo existente en su intersección con la galería superior. 18

Figura 9. Aspecto de la roca en la intersección entre galería ría superior y estribo derecho. 19

Figura 10. Condiciones de entrada al nivel de galería inferior. 19

Figura 11. Aspecto del pie de presa. 20

Figura 12. Vista de conjunto del aliviadero superficial. 20

Figura 14. Esquema altimétrico de la presa de El Mulato. 22

Figura 13. Elemento primitivo tipo «brick» con detalle de sus nodos y caras. 26

Figura 14. Nube de puntos obtenida por el vuelo del dron en la presa de El Mulato. 27

Figura 15. Vista del Modelo 2D por sección principal con las distintas zonas enumeradas. 28

Figura 16. Vista del Modelo 2D por sección principal con las condiciones de contorno aplicadas. 29

Figura 17. Vista del Modelo 2D por sección por estribos con las distintas zonas enumeradas. 29

Figura 18. Vista del Modelo 2D por sección por estribos con las condiciones de contorno aplicadas. 30

Figura 19. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo. 31

Figura 20. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba. 31

Figura 21. Vista en perspectiva de las condiciones de contorno del modelo 3D completo y de la interfaz. 32

Figura 22. Vista en planta del terreno de cimentación en el modelo 3D. 32

Figura 23. Vista en perspectiva del Modelo 3D del bloque central desde aguas abajo. 33

Figura 24. Vista en perspectiva del Modelo 3D del bloque central desde aguas arriba. 33

Figura 25. Vista en perspectiva de las condiciones de contorno del modelo 3D del bloque central y de la interfaz. 34

Figura 26. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb en FLAC3D. 37

Figura 27. Dominios del modelo Mohr-Coulomb utilizados en la definición de la regla de flujo 38

Figura 28. Ley de subpresiones. Caso estático, sin pantalla de drenaje. Sin grieta bajo del pie de aguas arriba. 40

Figura 29. Ley de subpresiones. Caso estático, con pantalla de drenaje. Sin grieta bajo el pie de aguas arriba. 41

Figura 30. Localización de las estaciones geomecánicas en la presa de El Mulato. 45
Figura 31. Criterio de signos para esfuerzos positivos. 50
Figura 32. Embalse vacío. Tensiones principales máximas. 51
Figura 33. Embalse vacío. Tensiones principales mínimas. 52
Figura 34. Embalse vacío. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento. 52
Figura 35. Embalse a umbral de aliviadero (N 741.30 m.s.n.m.) + subpresión. Tensiones principales máximas. 53
Figura 36. Embalse a umbral de aliviadero (N 741.30 m s.n.m.) + subpresión. Tensiones principales mínimas. 53
Figura 37. Embalse en coronación (N 741.30 m s.n.m.) + subpresión. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento. 54
Figura 38. Resultados obtenidos de la variación de la cohesión, fricción y tracción (I/II). 55
Figura 39. Resultados obtenidos de la variación de la cohesión, fricción y tracción (I/II). 56
Figura 40. Resultados obtenidos del incremento progresivo del nivel de embalse. 57
Figura 41. Resultados obtenidos del incremento de rigidez relativa entre la presa y el terreno. 58
Figura 42. Resultados obtenidos de la resistencia a tracción minorada y el incremento progresivo del nivel de embalse (I/III). 59
Figura 43. Resultados obtenidos de la resistencia a tracción minorada y el incremento progresivo del nivel de embalse (II/III). 60
Figura 44. Resultados obtenidos de la resistencia a tracción minorada y el incremento progresivo del nivel de embalse (III/III). 61
Figura 45. Curvas límite de estabilidad general para embalse a cota de coronación. 65
Figura 46. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento con dren rehabilitado. 66
Figura 47. Esquema propuesto auscultación. 70
Figura 48. Esquema propuesta auscultación sección A-A'. 71
Figura 49. Esquema propuesta auscultación sección B-B'. 71

PARTE I. ANTECEDENTES

1. ANTECEDENTES DE LA PRESA E INFORMACIÓN DISPONIBLE

1.1. Objetivos y alcance

El presente documento consiste en el Informe de modelización numérica de la presa de El Mulato asociado a los trabajos de Asistencia Técnica para la Modelización numérica de las presas del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria (EXP. Cont-5/19 G 192/2019) y ha sido preparado por el equipo técnico de iPresas, empresa especialista en análisis de riesgos y modelización numérica de infraestructuras hidráulicas.

El alcance de los trabajos que se presentan abarca el análisis de los documentos existentes sobre las presas, la visita a las presas, la modelización numérica y la evaluación de los márgenes de seguridad y conclusiones.

El documento se organiza en 4 partes diferenciadas que engloban los trabajos realizados para la presa de El Mulato:

1. Antecedentes.
2. Modelización y resultados.
3. Márgenes de seguridad, auscultación y conclusiones.
4. Anejos.

1.2. Antecedentes

La presa de El Mulato es una presa de gravedad de cuerpo mixto, los primeros 20 metros están formados por mampostería y un recrecimiento de hormigón vibrado con un perfil convencional con juntas verticales que envuelve aguas arriba a la presa original alcanzando los 43 metros de altura, la planta está conformada por dos alineaciones rectas.

Se encuentra localizada en el Barranco de Mogán — en la zona conocida como de las Vinagreras —, en el Término Municipal de Mogán, en la Isla de Gran Canaria, Provincia de Las Palmas. Las coordenadas U.T.M. del punto de intersección del Barranco de Mogán con el eje de la presa son X = 451 540 e Y = 3 088 250.

La cota del pie de presa aguas arriba es de 701 m s.n.m. y la de coronación 741.30 m s.n.m. donde la altura sobre el cauce natural en el pie del paramento de aguas arriba es de 40.30 m y la coronación tiene una longitud de 146 m con un ancho de 0.9 m. El paramento de aguas arriba tiene un talud contante de 0.05. Aguas abajo, el paramento de mampostería es escalonado con un talud de 0.8, mientras que el paramento aguas arriba es liso con un talud de 0.85. Está cimentada sobre Ignimbritas traquítico-riolíticas.

Dispone de dos tomas de agua que atraviesan la presa a distintos niveles, la toma de agua superior a la cota 720.50 m s.n.m. y la toma de agua inferior a la cota 709.00 m s.n.m. El aliviadero ocupa toda la longitud de coronación, vertiendo sobre el cuerpo de la presa originaria y en los estribos sobre el propio macizo rocoso.

La presa dispone de varias galerías, una de ellas, la galería inferior de acceso, situada en el margen izquierdo donde la cota en solera en su salida aguas abajo es la 707.00 m s.n.m esta galería alberga el desagüe de fondo. A continuación, se expone un resumen con el número de galerías con el que consta la presa:

- 3 galerías longitudinales (cotas 731 m s.n.m, 721 m s.n.m y 708 m s.n.m).
- 7 galerías transversales a la cota 731 m s.n.m.
- 4 galerías transversales a la cota 721 m s.n.m.
- 1 galería perimetral entre las cotas 708 m s.n.m y 721 m s.n.m.
- 1 galería inferior de acceso (cota 707.50 m s.n.m a 708 m s.n.m).

La presa, conforme al cálculo de volumen de embalse realizado por INTOPSA en el año 1996, genera un embalse de 0.76 Hm^3 a cota de N.M.N. (740.75 m s.n.m.), recogiendo las aguas de una cuenca vertiente de 6.1 km^2.

A continuación, en Figura 1 se muestra una sección tipo de la presa.

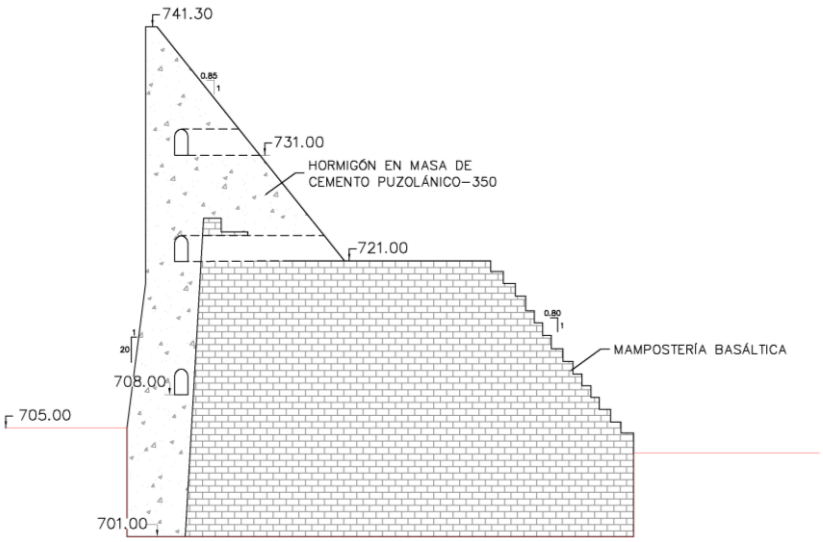


Figura 1. Sección tipo presa El Mulato.

La documentación proporcionada sobre la presa de El Mulato es la siguiente:

- Proyecto de Embalse de 907.767 m^3 en el Barranco de "Las Vinagreras". Año 1949.
- Documento XYZT: Presa del Mulato. Año 1994.

1.2.1. Proyecto 1949

A continuación, se citan algunas partes relevantes del proyecto de 1949:

«Optamos pues por dar a la presa una forma circular fijando el radio de 400 metros. La longitud total de la presa es de 100.50 metros según su coronación».

«Se adopta para perfil de la presa la sección triangular pasando la línea de agua por el vértice del triángulo».

«Nosotros hemos adoptado para la clase de fábrica que se ha de emplear, (mampostería con· mampuestos de roca basáltica) una densidad de 2400 Kg por metro cubico de fábrica de mampostería que ha sido hallada experimentalmente».

«Cuando se estudia la influencia del talud de aguas arriba a embalse lleno y vacío, en una presa de gravedad, se llega a la conclusión de que a embalse lleno el talud económico es en desplome, y a embalse vacío vertical. Recomiendan gran parte de ingeniaros dar al paramento de aguas arriba el talud 1/20 que tiene la ventaja de facilitar la ejecución y adherencia del enlucido, evitar el efecto desagradable que produce el talud vertical, y sirve sobre todo, para tener una ligera compresión en el paramento de aguas abajo en vacío. […] adoptaremos el talud 1/20 para el paramento de aguas arriba. […] Adoptaremos para valor del talud del paramento de aguas abajo 0.80».

«Para anchura de la presa en su coronación hemos adoptado 4.5 m que es aproximadamente 1/10 de la altura de presa. En el paramento de aguas arriba se dispone un parapeto de 1.20 x 0.75 m y en el de aguas abajo una barandilla metálica. Por la parte del paramento de aguas abajo se acuerda la coronación con dicho paramento, por un arco de círculo de 10.42 m de radio».

«Hemos establecido cinco tomas de agua: una por cada 10 metros 40 centímetros de altura del muro de presa, correspondiendo la inferior al punto más bajo y todas situadas en la ladera de la margen derecha».

En la Figura 2 se muestra una sección tipo según el proyecto de 1949, del que según parece observarse únicamente se construyeron los primeros 20 metros.

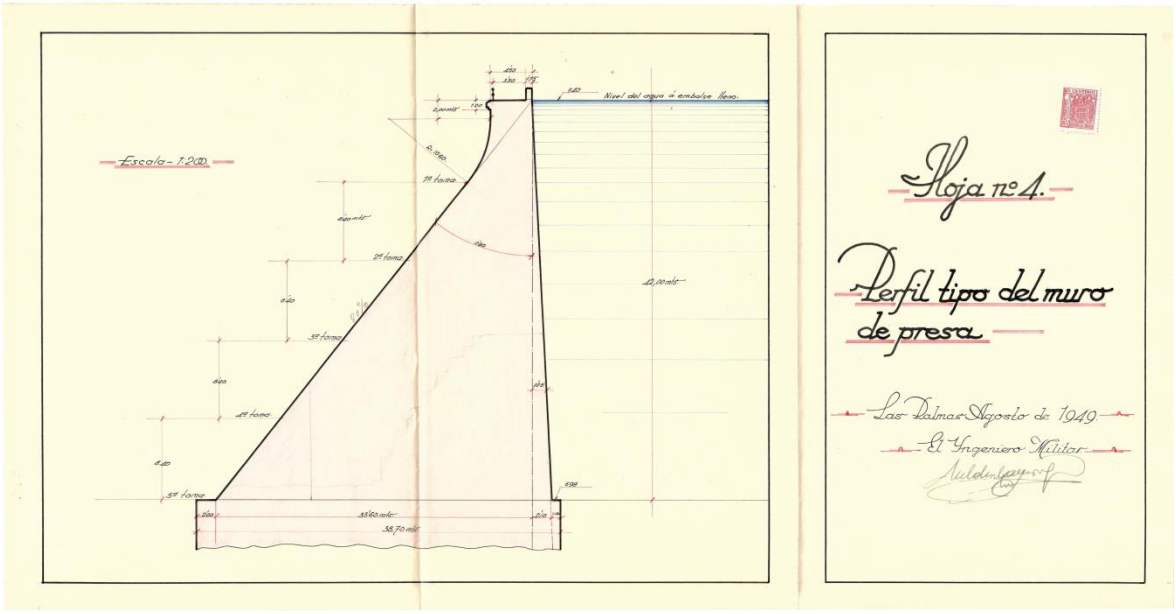


Figura 2. Sección tipo de la presa de El Mulato según el proyecto de 1949.

1.2.2. XYZT 1994

A continuación, se citan algunas partes relevantes recogidas en el Documento XYZT de 1994:

Pantalla de drenaje

«La red de drenaje está constituida por tres pantallas situadas a distancias diferentes del paramento y enlazadas con las galerías de visita, formando una red ortogonal de conductos».

«La pantalla principal, vertical, dista 2.70 metros del eje de presa, disponiéndose en clave de las galerías, terminando en la galería superior y prolongándose del orden de 1 metro por encima de su clave. Los drenes son de 75 mm de diámetro y 2.50 metros de separación, prolongándose en profundidad del orden de 10 a 15 metros de promedio».

«Una segunda pantalla a tresbolillo con la principal está situada en la junta hormigón-mampostería, terminando en un nicho de la galería intermedia en la cota 721, ya que ahí finaliza la presa antigua».

«Una tercera pantalla para el drenaje de la parte abierta de la fábrica, se sitúa por encima de la galería superior y de las mismas características que la principal, dista 1.50 metros del paramento aguas arriba, teniendo salida por su parte superior al paramento de aguas abajo».

Avenidas

«En avenidas de 500 años el caudal máximo promedio era de 36.8 m^3/seg y 30.5 m^3/seg utilizando ambos métodos, adoptándose para el cálculo del aliviadero 35 m^3/seg».

Geología del vaso y de la cerrada

«Que desde el punto de vista exclusivamente geológico, no existen en principio razones que impidan el recrecimiento de la presa hasta los 42 metros proyectados».

«Que el estribo derecho ofrecía originariamente excelentes condiciones de resistencia mecánica e impermeabilidad, siendo notablemente afectadas por las canteras abiertas, una aguas abajo y otra aguas arriba, junto al muro de presa, en especial en lo que a impermeabilidad respecta».

«Que el vaso está constituido exclusivamente por traquitas de gran impermeabilidad primaria. Solamente serían previsibles pérdidas por infiltración en la cerrada, debido a las fracturas existentes en el estribo izquierdo y a las fisuras provocadas en el derecho por la explotación de las canteras abiertas en él. Sería necesario realizar sin duda labores de impermeabilización por inyección de lechada de cemento».

«Que la presa actual está mal replanteada, ya que debería haberse desplazado aguas arriba, a fin de evitar que el pie de presa cayera fuera del cañón».

«Que la cimentación y empotramiento en las laderas de la obra construida son muy deficientes».

«Que no existen galerías ni conductos de drenaje precisos, para el debido control de las filtraciones y subpresiones».

«Que el talud aguas abajo está interrumpido antes de su empotramiento en la roca».

«Que el estribo izquierdo está cortado a bisel en su pie».

«Que aun corrigiendo las condiciones desfavorables del terreno, cosa relativamente fácil, habría que recrecer una obra mal replanteada, empotrada y construida».

Estabilidad estática de la presa

«Al quedar el perfil real de la presa muy superior al teórico necesario para la altura de 36 metros proyectada (el perfil de mampostería es para una presa de 43 metros de altura), se evidenciaba la estabilidad elástica de la presa, no creyendo ser necesaria ninguna comprobación pues los coeficientes de seguridad que se obtendrían serían muy superiores a los exigidos por la Instrucción para el Proyecto, Construcción y Explotación de Grandes Presas».

En el documento XYZT se recogen un conjunto de planos de la presa (Figura 3) tanto en planta como en alzado con distintas secciones tipo que facilitan el entendimiento de la presa y la realización de los modelos numéricos.

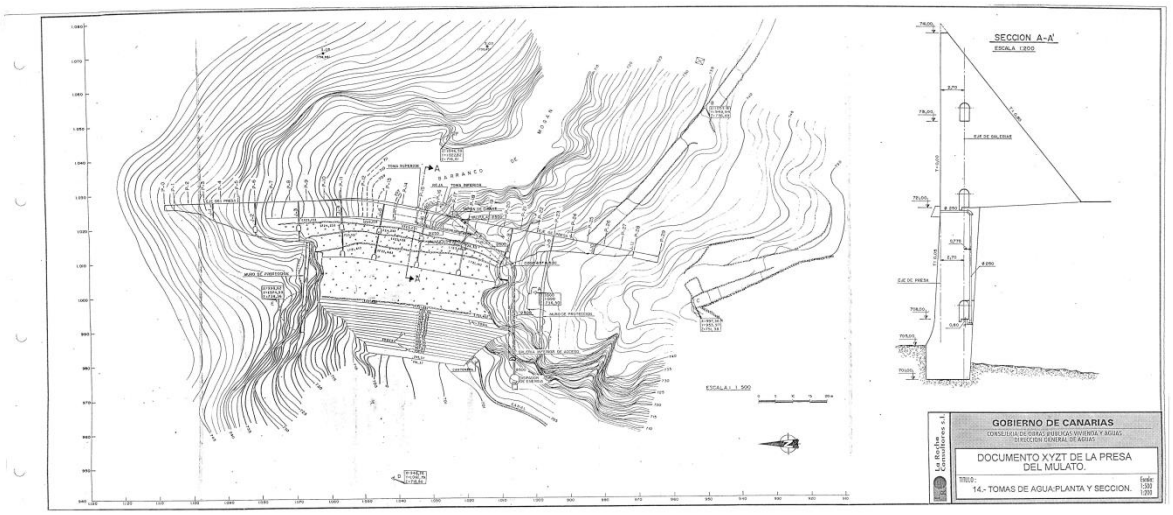


Figura 3. Planta y sección de la presa de El Mulato. Documento XYZT 1994.

2. VISITA TÉCNICA

La visita a la presa de El Mulato se realizó de forma conjunta con las 6 presas objeto del contrato (El Mulato, La Candelaria, El Vaquero, Fataga, Ayagaures, y La Gambuesa) y fue realizada por el Dr. Ignacio Escuder Bueno acompañado del director del contrato, D. Yonay Jesús Concepción Guodemar.

Uno de los primeros aspectos que cabe remarcar consiste precisamente en el hecho de poder haber realizado inspecciones de gran profundidad (accediendo a todas las galerías visitables, recorriendo coronación paramentos y vaso con todo el detalle posible, etc.) concentradas en un relativo corto espacio de tiempo, permitiendo una visión de conjunto y una valoración del estado de conservación relativo de cada una de ellas.

En cualquier caso, al haber sido iPresas la empresa adjudicataria de los contratos de modelación numérica de las presas de Chira y Soria bajo la coordinación del Dr. Ignacio Escuder Bueno, se está en disposición de hacer una serie de valoraciones sobre el conjunto de las 8 presas (en adelante "portfolio") explotadas por el Consejo Insular de Gran Canaria.

Los años de conclusión de las obras de las 8 presas abarcan desde 1952 hasta 1981, y su localización puede observarse en el siguiente mapa (Figura 4):

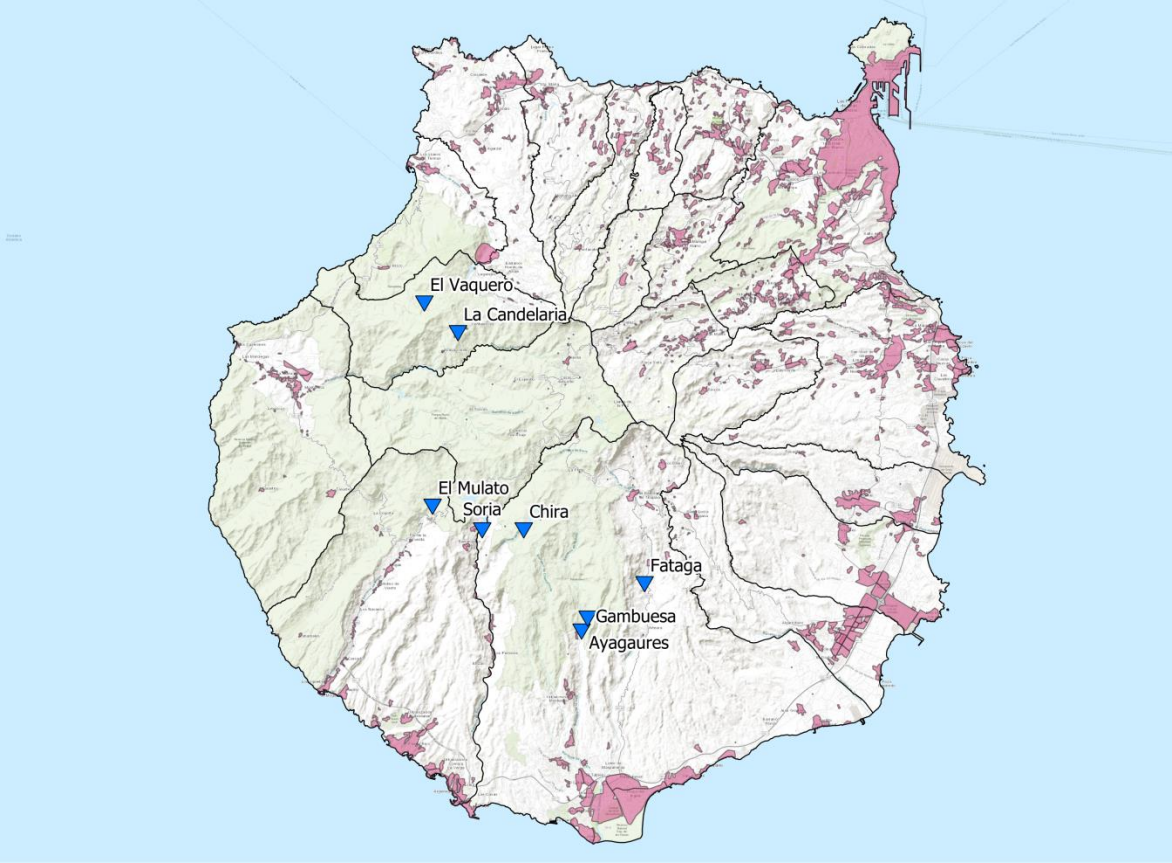


Figura 4. Localización del "portfolio" de presas explotado por el Consejo Insular de Gran Canaria.

En particular, algunos de los rasgos más característicos de estas presas se exponen a continuación:

- La presa de **Soria (1972)** es una presa muy singular dentro del portfolio por sus dimensiones (altura de 120 m) como por su tipología (arco-bóveda) si bien tiene algunas singularidades geométricas que hace de la misma una presa relativamente "singular" dentro de su tipología, tal y como ya se indicaba en el informe del contrato de consultoría "Asistencia Técnica para la modelización numérica de las presas de Chira y Soria" de diciembre de 2017. La cerrada tiene forma de "U" para abrirse en el cuarto superior de la presa, su aliviadero principal es de labio fijo y consta de un único desagüe de fondo.
- La presa de **Chira (1964) y** la presa de **Ayagaures (1952)** son ambas de gravedad y planta curva, con alturas moderadas de 32 m y 40 m respectivamente, y con disposición de sillares en ambos paramentos y dispuestas sobre cerradas con la parte inferior en forma de "U" para abrirse significativamente en la parte superior de ambas presas. Carecen de galerías y juntas verticales y sus aliviaderos son ambos de labio fijo y de diseño relativamente singular (no tipificado), careciendo de desagüe de fondo.
- Las presas de **El Vaquero (1971) y El Mulato (1981)** son ambas de gravedad y planta recta, habiéndose ambas construido en dos fases distintas, pudiéndose afirmar de ambas que en su estado actual son "recrecimientos" de presa. Otras características comunes a ambas son su planta recta, la relativa abundancia de galerías (dos niveles de galerías en el caso de El Vaquero y tres niveles de galerías en El Mulato para alturas de 40.50 m y 40 m respectivamente) la falta de mantenimiento tanto de dichas galerías como de todo su sistema de drenaje y el uso de mampostería (en el caso de El Vaquero en ambas fases constructivas y en el caso de El Mulato solo en la presa original, habiéndose construido el recrecimiento con hormigón vibrado). La forma de la cerrada en ambos casos puede asimilarse a una "U" abierta. Igualmente comparten órganos de desagüe que no garantizan un adecuado comportamiento hidráulico.
- Las presas de **La Candelaria (1969)** y de **Fataga (1973)** son ambas de gravedad y planta recta de mampostería, en el segundo caso combinado con hormigón ciclópeo, carentes de juntas verticales, con alturas de 32 m y 56 m respectivamente, con una relativa abundancia de galerías (3 y 4 niveles respectivamente y un drenaje que no puede considerarse operativo. La cerrada de la presa de la candelaria es más bien en "V" mientras que en La Fataga la forma es en U, abriéndose significativamente en la parte más alta. comparten órganos de desagüe con un deficiente diseño hidráulico.
- La presa de **La Gambuesa (1971)** es una presa de gravedad y planta recta de hormigón ciclópeo, con altura máxima de 54 m, dotada de juntas verticales, que dispone de tres niveles de galerías, de un sistema de drenaje no operativo y una cerrada en forma de "U". El aliviadero superficial se encuentra dañado en su zona de reintegro y disipación de energía.

En conjunto, más allá de las consideraciones particulares sobre la presa de El Mulato que se exponen a continuación, puede afirmarse que el portfolio de presas presenta singularidades propias y que difieren de las vigentes en esta misma época, tanto dentro como fuera de España, tanto desde el punto de vista estructural como hidráulico.

La visita de la presa de El Mulato transcurrió con todo el detalle posible a lo largo de la coronación, ambos paramentos, los estribos, el cuerpo de presa, el pie de presa, y los órganos de desagüe, tal y como puede observarse en la siguiente secuencia fotográfica (Figura 5 a Figura 12).



Figura 5. Vista del paramento de aguas arriba y del vaso del embalse.



Figura 6. Vista de la coronación y paramento de aguas abajo.



Figura 7. Aspecto de la galería superior.



Figura 8. Péndulo existente en su intersección con la galería superior.



Figura 9. Aspecto de la roca en la intersección entre galería ría superior y estribo derecho.



Figura 10. Condiciones de entrada al nivel de galería inferior.



Figura 11. Aspecto del pie de presa.



Figura 12. Vista de conjunto del aliviadero superficial.

En resumen, las observaciones de mayor relevancia sobre el estado de la presa que pueden ser importantes para la elaboración de los modelos numéricos de comportamiento son:

- La geología de la cerrada no presenta características singulares de estratificación y/o discontinuidades que puedan comprometer la estabilidad general de la presa, si bien el estribo izquierdo parece encontrarse en peor estado que el derecho en su parte inferior.
- La presa es de planta recta si bien presenta su recrecimiento algunos quiebros en planta. La parte antigua no dispone de juntas y dispone de tres niveles de galerías, si bien no se puede considerar operativo en caso de que exista como tal el sistema de drenaje, ya que necesita mantenimiento.
- La coronación de la presa se encuentra en buen estado y no se han encontrado indicios de mal comportamiento.
- El aspecto superficial de ambos paramentos en la parte del recrecido es buena, y en la parte antigua parecen reflejar problemas de conservación por presencia de humedades que habrían permitido el crecimiento de abundante vegetación.

- El pie de presa se encuentra igualmente con abundante vegetación siendo previsible que se estén dando filtraciones a través del cimiento.
- La toma del aliviadero tiene un perfil hidráulico si bien el reintegro y estructura de disipación de energía no presentan diseño hidráulico y se ubican sobre la presa antigua directamente.

3. REVISIÓN ALTIMÉTRICA

Tras la finalización de los trabajos de modelización, ha sido posible la obtención de información topográfica con la suficiente precisión y referencia altimétrica para permitir una actualización de las cotas de las presas titularidad del Consejo Insular de Aguas de Gran Canaria bajo un mismo sistema de referencia.

En lo que respecta a la presa de El Mulato, la cota de coronación se localiza a 744.90 m s.n.m., es decir, 3.6 metros más alta que lo indicado en el presente documento. En la misma línea, la cota del umbral del aliviadero es la 744.35 m s.n.m., es decir, 3.6 metros más alto que lo indicado en el presente documento. En la Figura 13, se muestra un esquema de cotas de la presa de El Mulato.

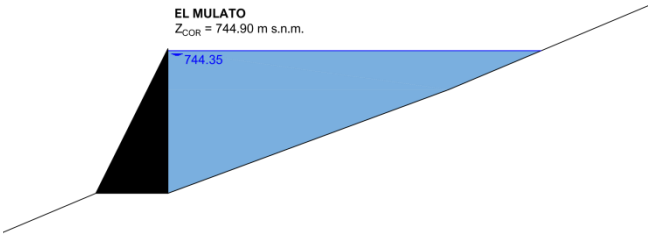


Figura 13. Esquema altimétrico de la presa de El Mulato.

Por lo expuesto anteriormente, las cotas indicadas en el documento, son 3.6 metros inferiores a las reales.

PARTE II. MODELIZACIÓN Y RESULTADOS

4. 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 linéales 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 desventajas 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.

4.1. Tipo de elemento 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 (Figura 14), 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 Figura 14, se muestra el elemento tipo «brick» con detalle de la numeración de sus nudos y sus caras.

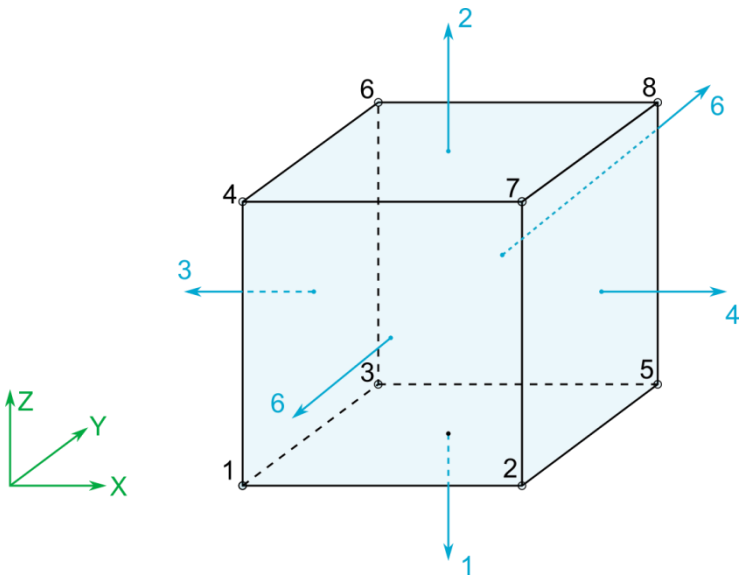


Figura 14. Elemento primitivo tipo «brick» con detalle de sus nodos y caras.

4.2. 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.

5. MODELOS GEOMÉTRICOS CONSIDERADOS

5.1. Definición geométrica de los modelos

La definición geométrica de los modelos se ha realizado partiendo de los planos del «Documento XYZT presa de El Mulato» de 1994, al ser la definición geométrica disponible más reciente de la presa; y se ha verificado mediante un vuelo LIDAR y fotogramétrico para la obtención de 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 Figura 15, se muestra una vista cenital y una perspectiva de la nube de puntos empleada como base.

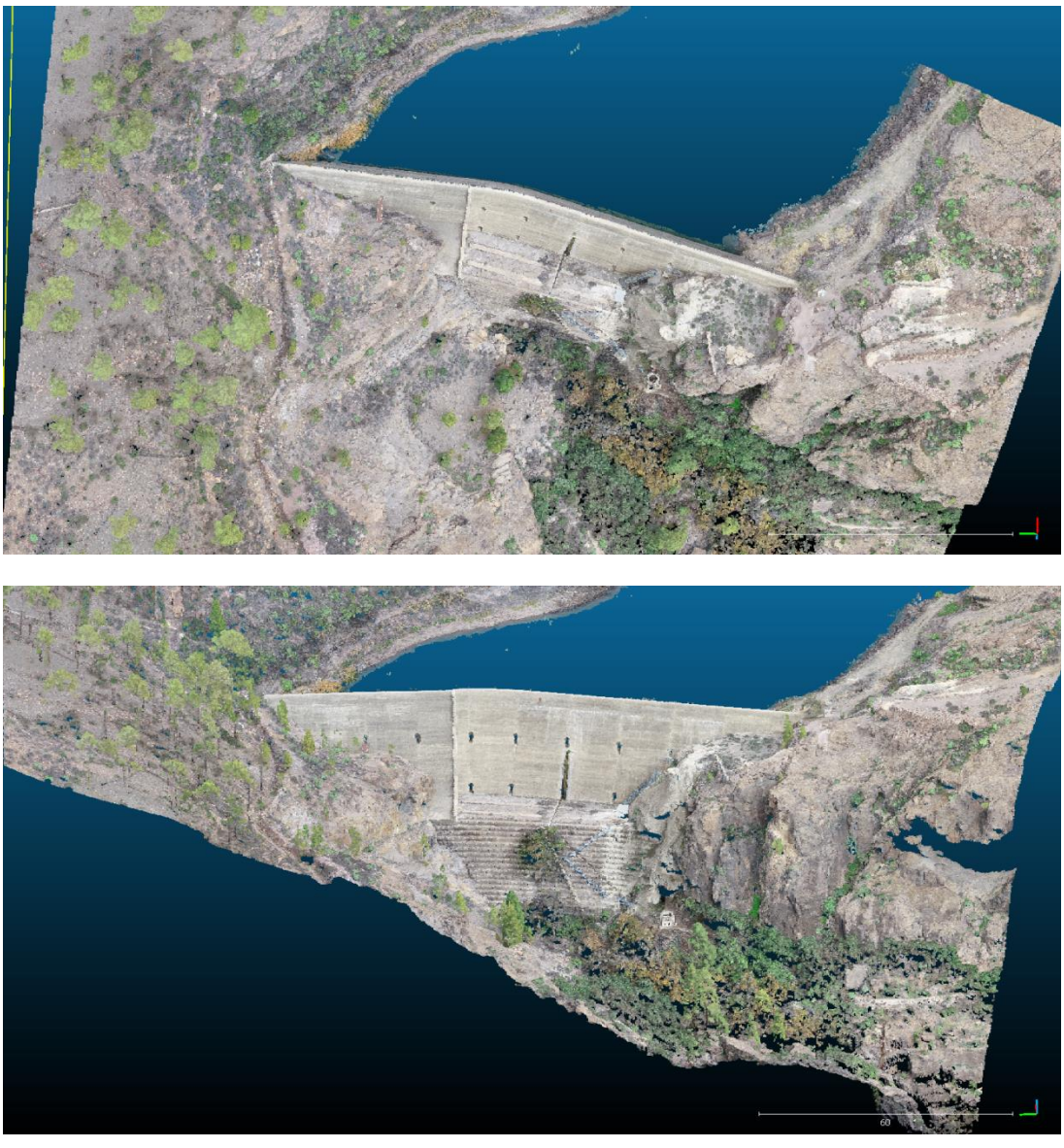


Figura 15. Nube de puntos obtenida por el vuelo del dron en la presa de El Mulato.

Se han detectado diferencias entre la geometría real y la presentada en los planos, por lo que se ha actualizado la sección tipo, quedando tal y como se muestra en la Figura 1.

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 para la definición de la parte subterránea de la presa.

Con esta definición geométrica se han definido 4 geometrías, dos de ellas para permitir un cálculo bidimensional en hipótesis de deformación plana y las otras dos para la realización del cálculo tridimensional. Las geometrías bidimensionales se han realizado una por la sección de mayor altura y otra por una sección característica en estribo, con un mayor empotramiento. Los modelos tridimensionales se han elaborado para la sección central del valle y para la presa competa, ambos modelos incluyen cimentación.

5.2. Modelos 2D

5.2.1. Modelo 2D de la sección central (M2D-C)

Este modelo consiste en un modelo bidimensional puro de la sección central más profunda. El modelo se ha elaborado a partir de la definición geométrica de la sección tipo mostrada en la Figura 1. La sección presenta una altura sobre el cauce de 36.70 metros. No se han modelado los pretiles. Se ha incluido la cimentación de forma simplificada.

Respecto a las condiciones de contorno, el modelo consta de 1842 elementos y 2247 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:

- Figura 16. Vista del Modelo 2D por sección principal con las distintas zonas enumeradas.
- Figura 17. Vista del Modelo 2D por sección principal con las condiciones de contorno aplicadas.

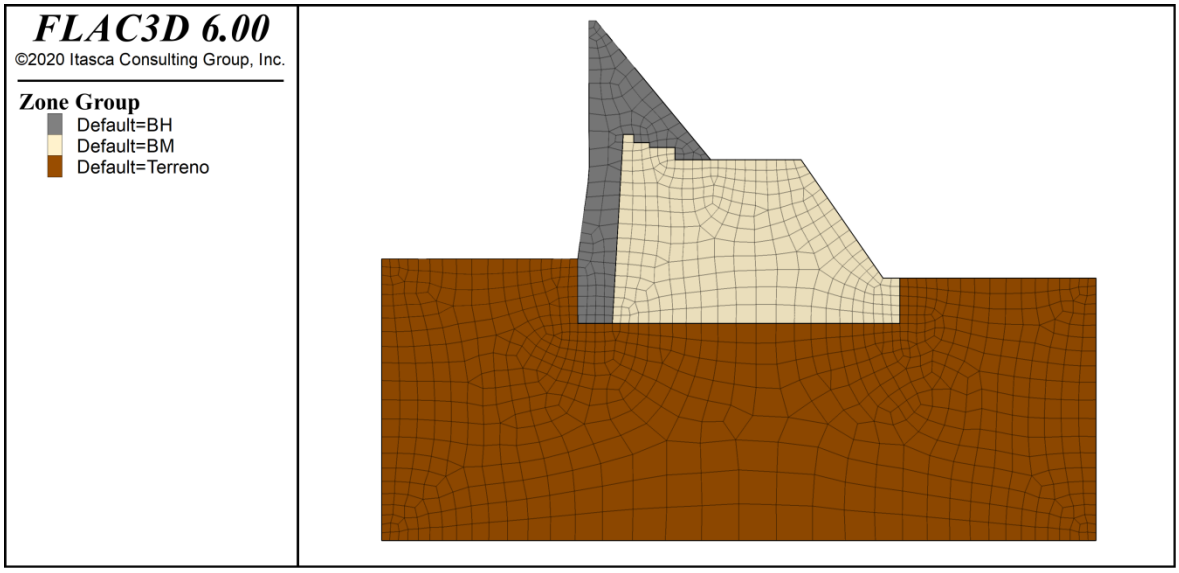


Figura 16. Vista del Modelo 2D por sección principal con las distintas zonas enumeradas.

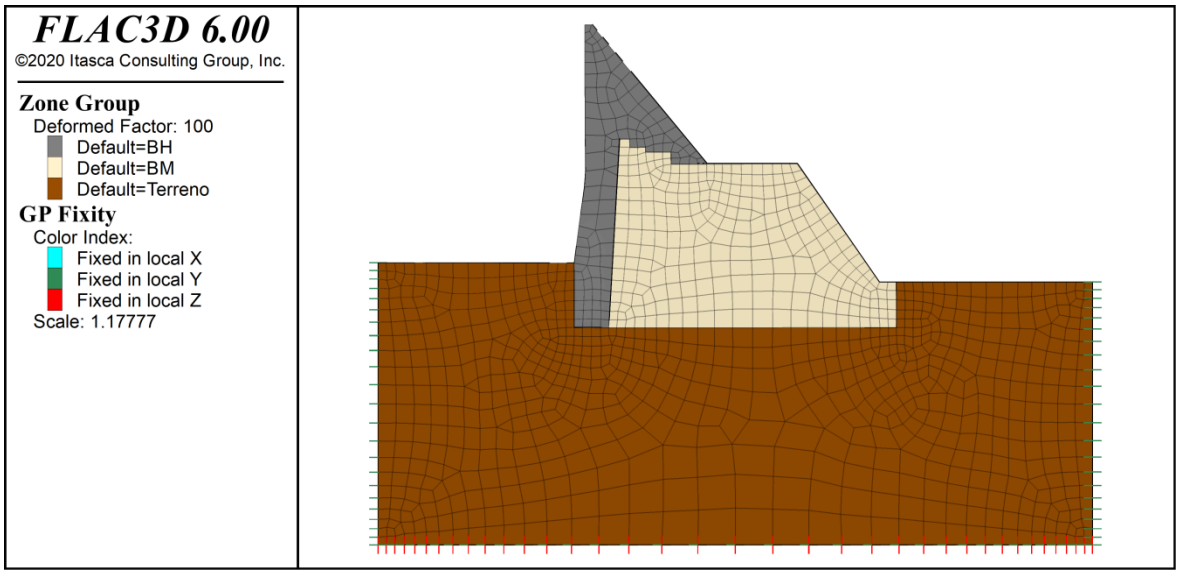


Figura 17. Vista del Modelo 2D por sección principal con las condiciones de contorno aplicadas.

5.2.2. Modelo 2D de la sección del estribo (M2D-E)

Este modelo consiste en un modelo bidimensional que caracteriza la sección tipo de los estribos. El modelo ha sido elaborado a partir de la definición geométrica anteriormente reseñada. La sección presenta una altura sobre el cauce de 5.5 metros. No se han modelado los pretiles. Se ha incluido la cimentación de forma simplificada.

Respecto a las condiciones de contorno, el modelo de diferencias finitas consta de 445 elementos y 1016 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:

- Figura 18. Vista del Modelo 2D por sección por estribos con las distintas zonas enumeradas.
- Figura 19. Vista del Modelo 2D por sección por estribos con las condiciones de contorno aplicadas.

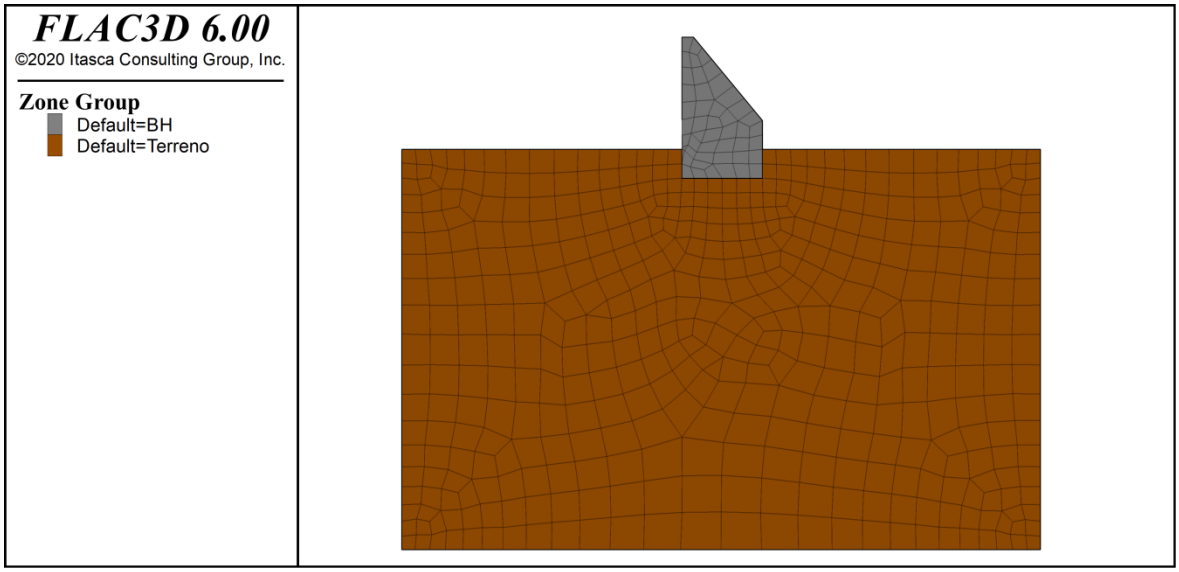


Figura 18. Vista del Modelo 2D por sección por estribos con las distintas zonas enumeradas.

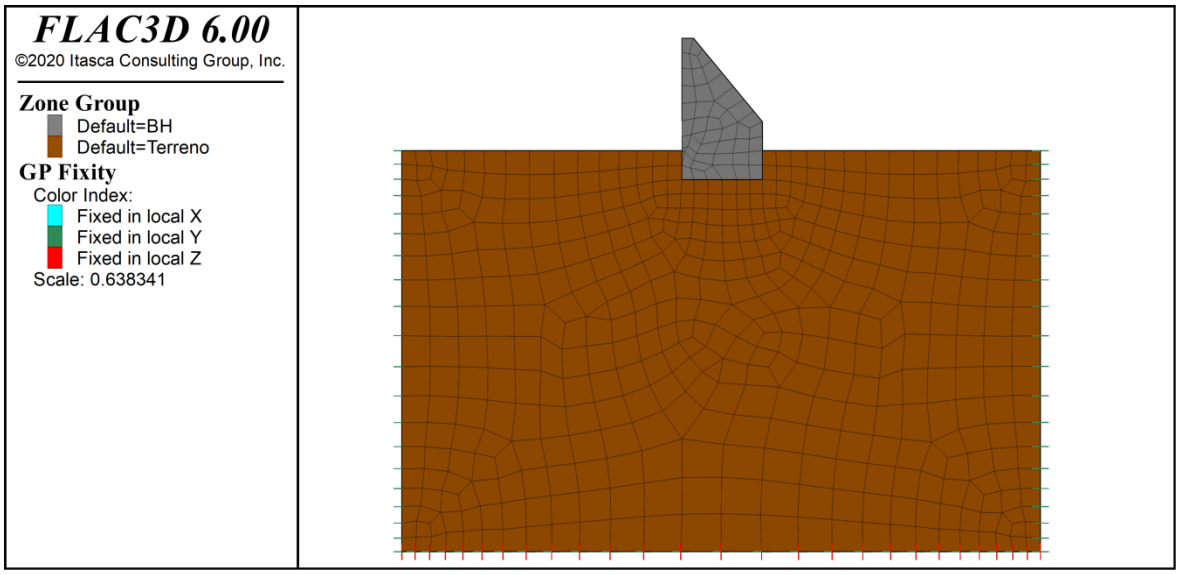


Figura 19. Vista del Modelo 2D por sección por estribos con las condiciones de contorno aplicadas.

5.3. Modelos 3D

Se han realizado dos modelos tridimensionales: un modelo completo y un modelo del bloque central. Como característica especial de estos dos modelo es la simulación del proceso constructivo mediante bloques.

5.3.1. Modelo tridimensional (M3D-Completo)

En este modelo se modeliza de forma tridimensional la presa completa, así como el terreno circundante. El terreno 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.

Por otro lado, la interacción entre bloques también se ha realizado a través de una interfaz, permitiendo, de esta forma, representar lo más fielmente posible el comportamiento de las juntas verticales.

Respecto a las condiciones de contorno, el modelo de diferencias finitas consta de 59 173 elementos y 34 696 nodos, con tres grados de libertad cada nodo: desplazamientos en las direcciones X, Y y Z. A continuación, se muestran en detalle la geometría del modelo según se indica:

- Figura 20. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo.
- Figura 21. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba.
- Figura 22. Vista en perspectiva de las condiciones de contorno del modelo 3D completo y de la interfaz.
- Figura 23. Vista en planta del terreno de cimentación en el modelo 3D

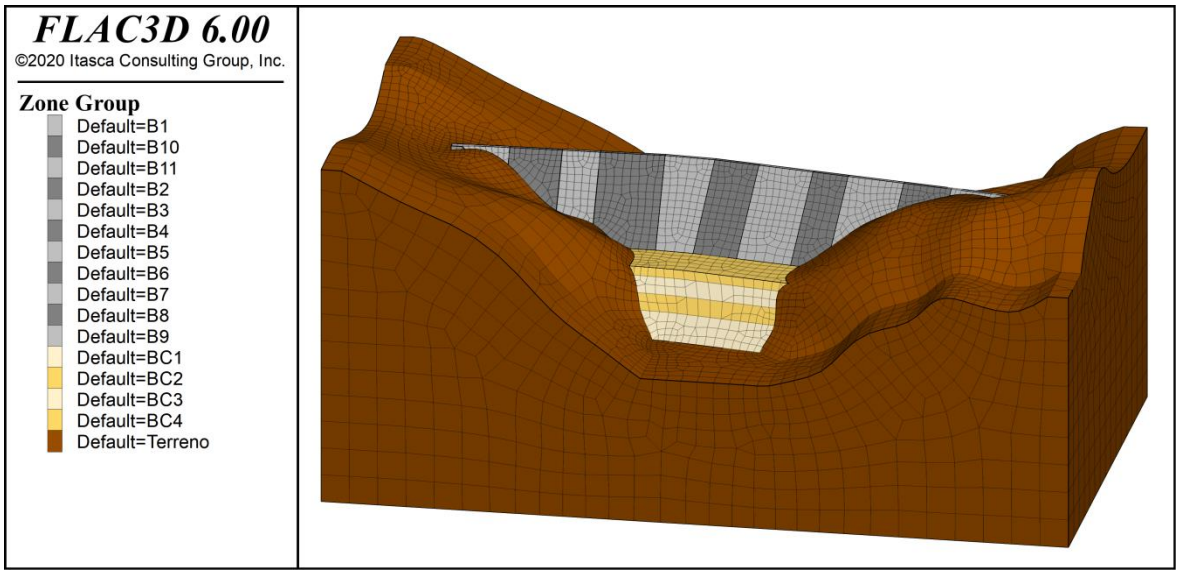


Figura 20. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas abajo.

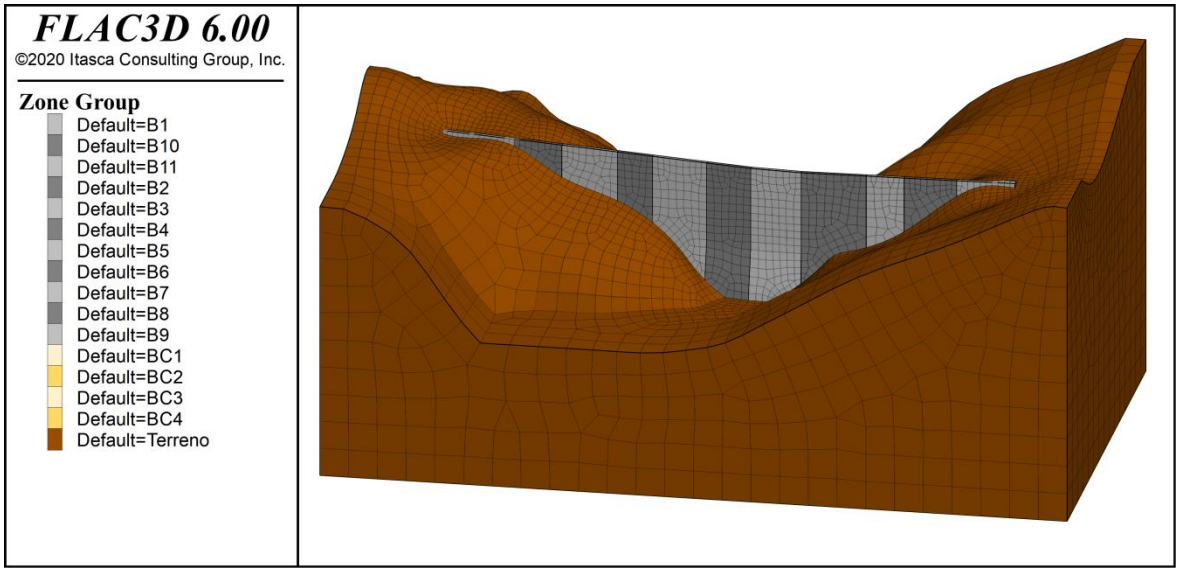


Figura 21. Vista en perspectiva del Modelo 3D completo desde aguas arriba.

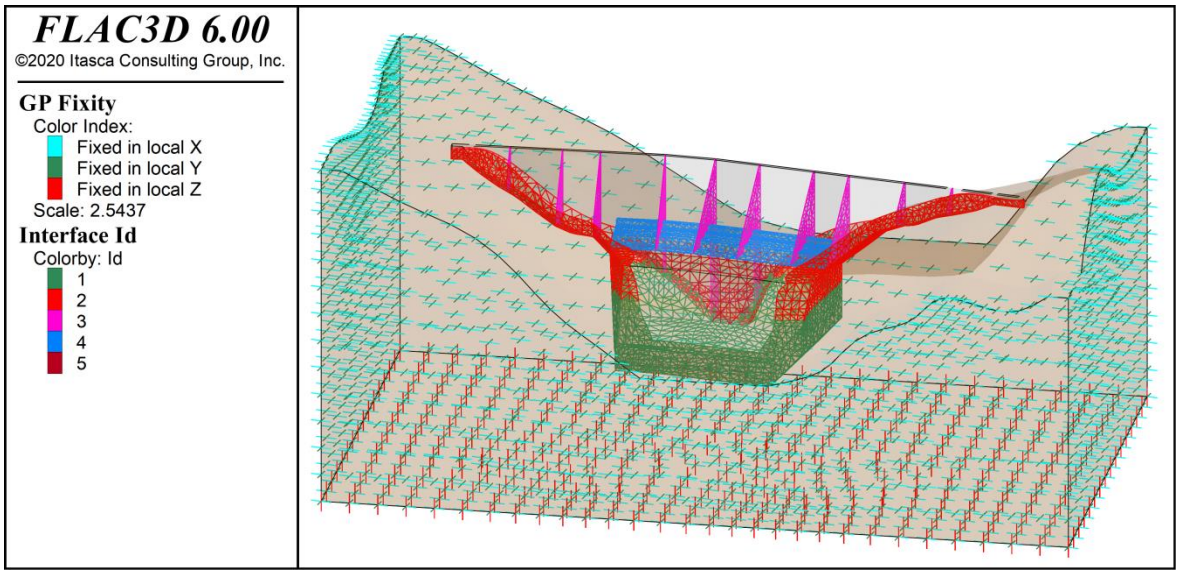


Figura 22. Vista en perspectiva de las condiciones de contorno del modelo 3D completo y de la interfaz.

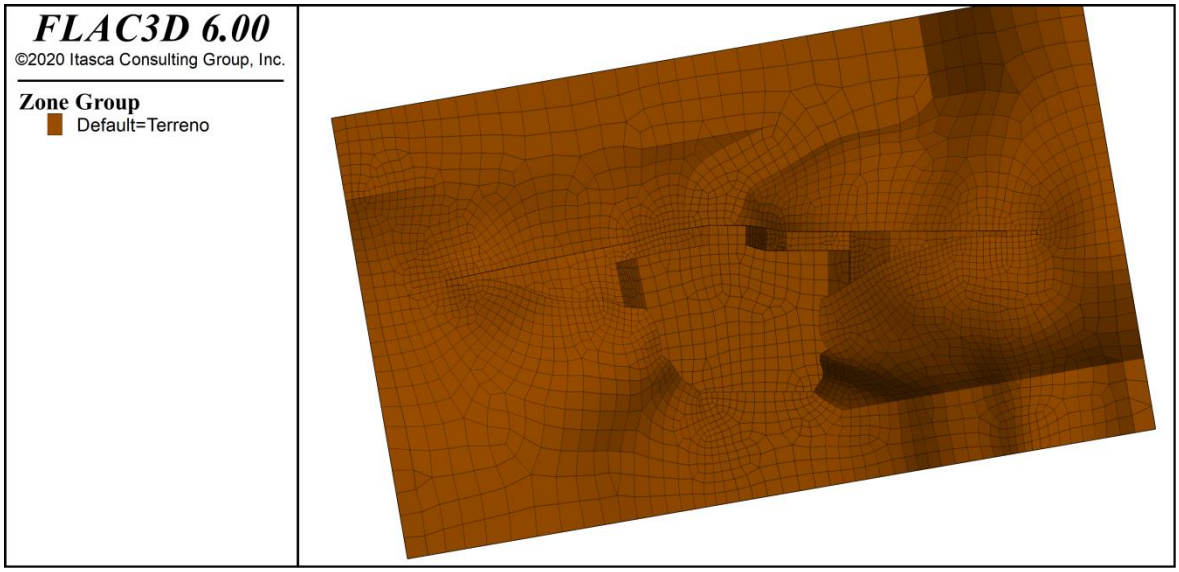


Figura 23. Vista en planta del terreno de cimentación en el modelo 3D.

5.3.2. 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 59 173 elementos y 33 267 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 terreno según se indica:

- Figura 24. Vista en perspectiva del Modelo 3D del bloque central desde aguas abajo.
- Figura 25. Vista en perspectiva del Modelo 3D del bloque central desde aguas arriba.
- Figura 26. Vista en perspectiva de las condiciones de contorno del modelo 3D del bloque central y de la interfaz.

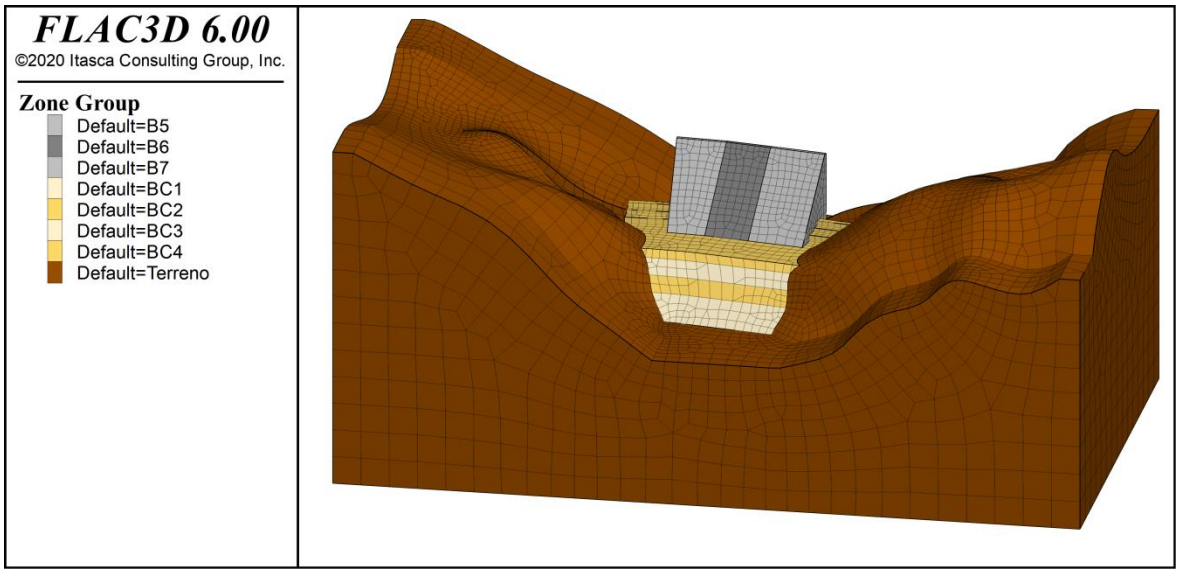


Figura 24. Vista en perspectiva del Modelo 3D del bloque central desde aguas abajo.

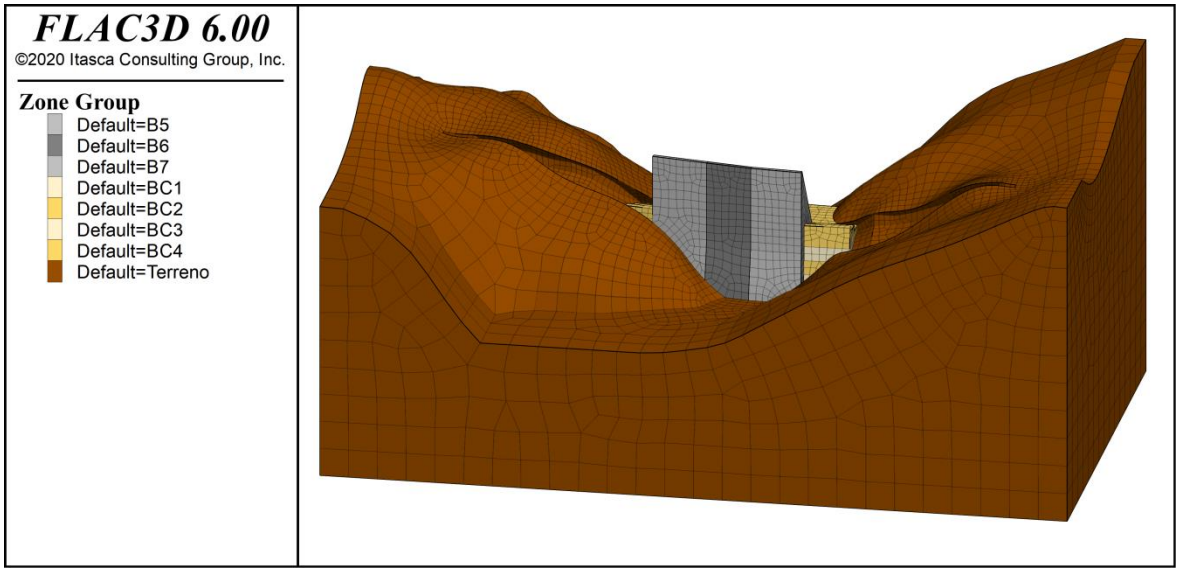


Figura 25. Vista en perspectiva del Modelo 3D del bloque central desde aguas arriba.

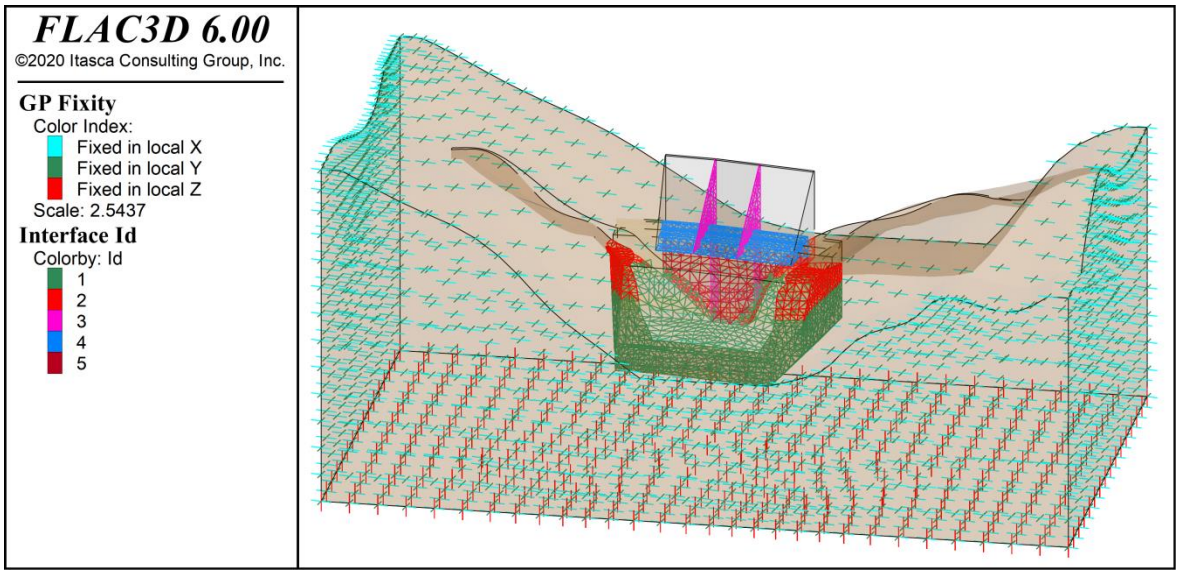


Figura 26. Vista en perspectiva de las condiciones de contorno del modelo 3D del bloque central y de la interfaz.

6. MODELOS CONSTITUTIVOS

La presa a estudiar es una presa mixta (mampostería y hormigón) de gravedad 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 hormigón ciclópeo, 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 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.

6.1. 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:

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

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:

$$\alpha_2 = K - \frac{2}{3}G \tag{2}$$

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

$$\sigma_{ij}^{N} = \sigma_{ij} + \Delta\sigma_{ij} \tag{3}$$

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:

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

6.2. Modelo elasto-plástico de Mohr-Coulomb

Este modelo incorpora un criterio de plastificación a la respuesta general elástica, alcanzado 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 tensiones principales 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:

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

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:

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

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

$$\sigma_1 \le \sigma_2 \le \sigma_3 \tag{7}$$

este criterio se puede representar en el plano (σ_1, σ_3) como se observa en la Figura 27. La envolvente de fallo f (σ_1, σ_3) = 0 se define de los puntos A y B por el criterio de falla de Mohr-Coulomb $f^s = 0$ con

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

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

$$f^t = \sigma_3 - \sigma^t \tag{9}$$

donde ϕ es el ángulo de fricción, c es la cohesión, σ^t es la resistencia a la tracción, y

$$N_\phi = \frac{1+\sin\phi}{1-\sin\phi} \tag{10}$$

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

$$\sigma^t = \frac{c}{\tan\phi} \tag{11}$$

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

$$g^s = -\sigma_1 + \sigma_3 N_\psi \tag{12}$$

donde ψ es el ángulo de dilatación y

$$N_\psi = \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi} \tag{13}$$

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

$$g^t = f^t = \sigma_3 - \sigma^t \tag{14}$$

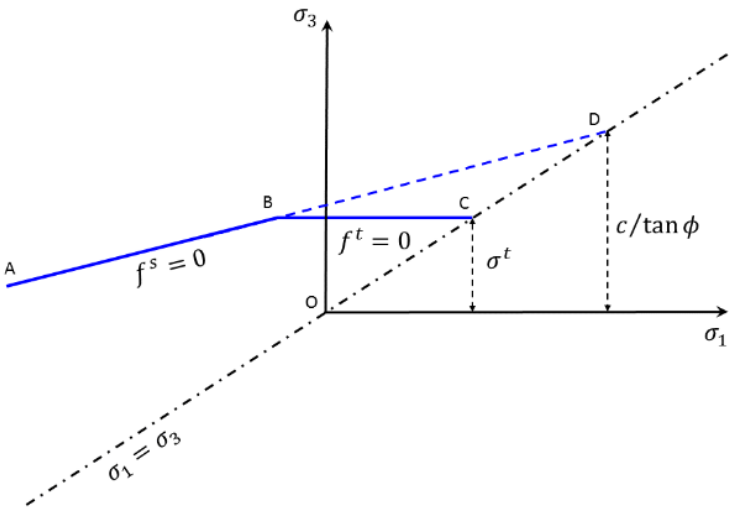


Figura 27. Criterio de rotura de Mohr-Coulomb en FLAC3D[1].

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) (Figura 28) divide el dominio donde una suposición elástica violando la función de rendimiento compuesta en dos dominios: dominio 1 y dominio 2 Figura 28.

Si el punto de tensión cae dentro del dominio 1, se declara la falla de 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 una falla de tracción, y el nuevo punto de tensión se ajusta a f^t = 0 usando una regla de flujo derivada usando g^t.

[1] ITASCA CONSULTING (2017). Manual de FLAC3D.

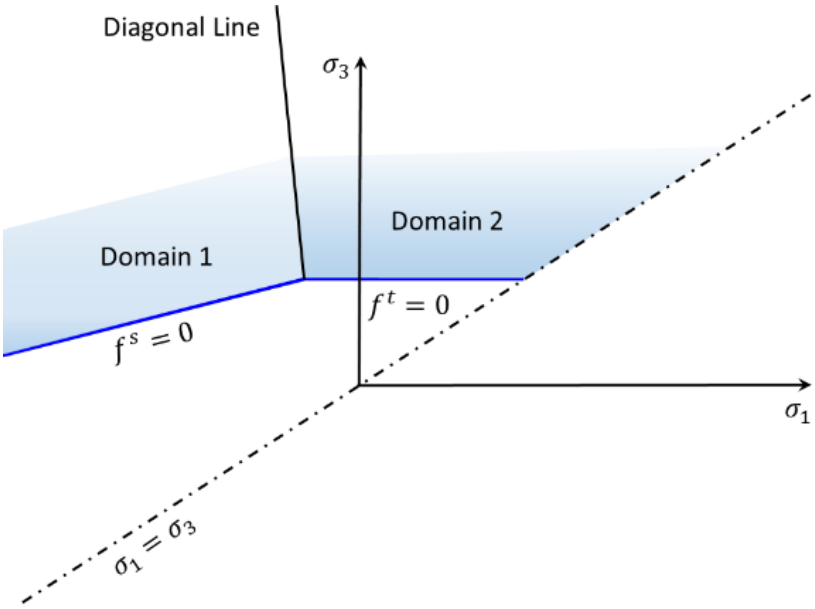


Figura 28. Dominios del modelo Mohr-Coulomb utilizados en la definición de la regla de flujo[2]

[2] TASCA CONSULTING (2017). Manual de FLAC3D.

7. 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[3]. Las acciones que indica el citado artículo son las siguientes:

- Peso propio.
- Empuje hidrostático.
- Subpresión.
- 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.
- Subpresión.

Debido que la presa dispone de juntas verticales, los cambios de volumen del cuerpo de la presa debido a incrementos y decrementos térmicos no se encuentran restringidos, por lo que este modelo no se realiza la simulación térmica.

Por otro lado, destacar que los efectos sísmicos no han sido 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.

7.1. Acciones

7.1.1. 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.

En cuanto al material del cuerpo de presa está compuesto por mampostería basáltica y hormigón en masa de cemento puzolánico-350. Según se recoge en el «Documento XYZT presa de 'El Mulato'» la mampostería basáltica tiene una densidad de 2300 kg/m^3 y el hormigón en masa una densidad de 2300 kg/m^3, por lo que se adopta una densidad de 2300 kg/m^3 para ambos materiales en este estudio.

[3] 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

7.1.2. Empuje hidráulico

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

$$p_w = \gamma_w h \tag{15}$$

dónde:

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 γ_w = 9810 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.

7.1.3. 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[4], sobre las cuales se basa también las recomendaciones nacionales de la GT-2[5].

En el caso particular de esta presa, no puede considerarse operativo el sistema de drenaje por lo que se trata como si fuera 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 Figura 29.

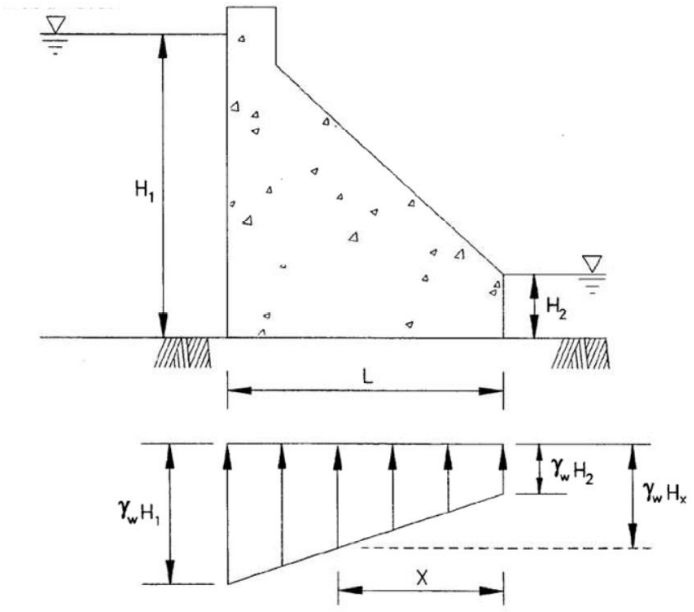


Figura 29. Ley de subpresiones. Caso estático, sin pantalla de drenaje. Sin grieta bajo del pie de aguas arriba.

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

En el apartado *10. Análisis de la estabilidad general,* se plantea un escenario futuro con la rehabilitación del sistema de drenaje. En este caso, se trata la subpresión como situación con pantalla de drenaje y sin grieta al pie.

De acuerdo con el criterio del USACE[6], la eficacia de la pantalla de drenaje se mide mediante un coeficiente E, que adopta valores entre 0 y 1. Un valor de eficacia 0 significa que los drenes son totalmente inoperativos, mientras que un valor de 1 indica que los drenes funcionan perfectamente. En este caso, y dado que se parte de una situación inicial con los drenes totalmente rehabilitados se toma un valor de E de 0.67 (lo que supone una efectividad de los drenes del 67%).

En este caso, la ley de subpresiones varía linealmente desde un valor en el pie de aguas arriba (H_1) igual al nivel en el embalse hasta un valor H_3 bajo la pantalla de drenaje (situada a una distancia x desde el pie aguas arriba), y hasta un valor en el pie de aguas abajo (H_2) igual al nivel en ese punto, tal y como se observa en la Figura 30.

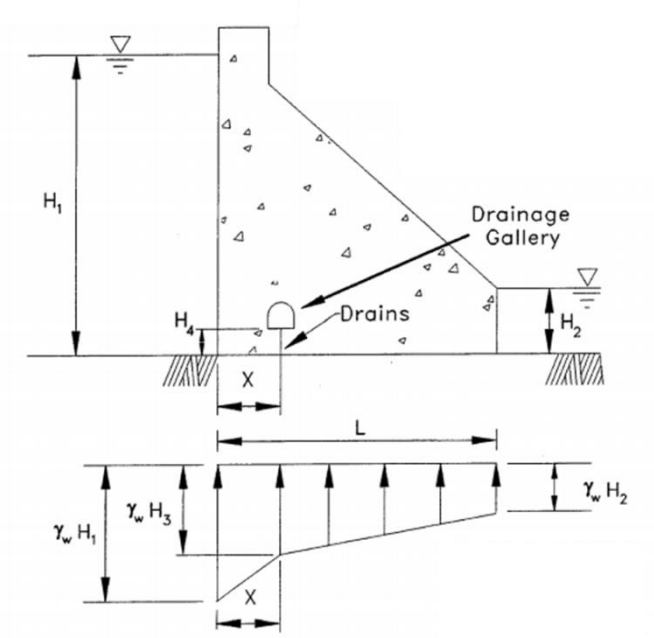


Figura 30. Ley de subpresiones. Caso estático, con pantalla de drenaje. Sin grieta bajo el pie de aguas arriba.

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

7.2. Estrategias de simulación

El objetivo de este trabajo es la evaluación tenso-deformacional y resistente de la presa de El Mulato, 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.

7.2.1. 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 a cota de coronación (741.30 m s.n.m.) + subpresión.

En este análisis no se plantea el escenario Embalse a umbral de aliviadero + subpresión, dado que el aliviadero es coincidente la coronación de la presa. Todos estos escenarios se simulan en los cuatro modelos propuestos, empleando para ello la mejor estimada de los parámetros resistentes y tenso-deformacionales, la cual se justifica en el apartado 8. Caracterización resistente y tenso-deformacional.

7.2.2. 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 cuatro 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 1 se presenta las recomendaciones realizadas por Rocha[7]. En este escenario se toman los valores límite de cada relación para disminuir la rigidez del cimiento.

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 1. Efecto de la relación Ec/Em en el comportamiento de presas de gravedad según Rocha (Extraído de Romana[8]).

Escenario 4

En este escenario, se realiza una reducción de la resistencia a tracción del hormigón 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[9]

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \tag{16}$$

Dónde: α_{ct}: Coeficiente que tienen en cuenta los efectos a largo plazo en la resistencia a tracción y los efectos desfavorables (valor recomendado α_{ct} =1); γ_c: Coeficiente parcial de seguridad (γ_c=1).

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

$$\sigma_T = f_{ctk,0,05} = 0.7 \cdot f_{ctm} \tag{17}$$

Una vez minorada la resistencia a tracción del hormigón, 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.

7.2.3. 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.

[7] 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.

[8] Romana Ruiz, Manuel. 2011. "Cimentaciones de presas de gravedad: requisitos geomecánicos". Revista de Obras Públicas nº 3527. Año 158.

[9] Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación. UNE-EN 1992-1.1. 2013.

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 rotura entre las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras en caso de rotura plana[10]:

$$T \leq \frac{N \cdot \operatorname{tg} \varphi}{F_1} + \frac{c \cdot S}{F_2} \tag{18}$$

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

- Embalse a cota de coronación (741.30 m s.n.m.) + subpresión.

Por último, se estiman las curvas límites de deslizamiento cuyo objetivo es hallar parejas de cohesión y fricción que agotan la estabilidad en el contacto presa-cimiento, lo que supone, por tanto, valores del factor de seguridad igual a la unidad.

[10] Guías Técnicas de Seguridad de Presas: Criterios para proyectos de presas y sus obras anejas. Tomo 1. Comité Nacional Español de Grandes Presas (CNEGP).

8. CARACTERIZACIÓN RESISTENTE Y TENSO-DEFORMACIONAL

8.1. Caracterización de la cimentación

El macizo rocoso sobre el que se cimienta la presa está caracterizado por ignimbritas riolíticas extracaldera de la Formación Tranquiítico-Riolítica del Ciclo I del vulcanismo de la isla de Gran Canaria. Las ignimbritas forman apilamiento sucesivo en bancos de potencia métrica variable, entre 1 a 5 metros, dando un relieve escalonado o en graderío.

La caracterización de las características de la cimentación se realizó en base a 4 estaciones geomecánicas realizadas en las inmediaciones de la presa, cuyo emplazamiento se muestra en la Figura 31 y se detalla en coordenadas UTM en la Tabla 2.



Figura 31. Localización de las estaciones geomecánicas en la presa de El Mulato.

Estación	Coordenada X (Oeste)	Coordenada Y (Norte)	Altitud (Z)
MU-01	431 347	3 088 306	753
MU-02	431 354	3 088 322	745
MU-03	431 357	3 088 351	727
MU-04	431 367	3 088 403	734

Tabla 2. Ubicación de las estaciones geomecánicas en la presa de El Mulato.

A partir de los datos recopilados en las estaciones geomecánicas se ha procedido al cálculo de dos índices geomecánicos: RMR (Rock Mass Rating) y DMR (Dam Mass Rating). El informe completo de las estaciones geomecánicas se muestra en el Anejo 1.

El índice RMR, el cual permite dar una idea de la calidad del macizo rocoso, además de servir como base de otras clasificaciones geomecánicas. En la Tabla 3, se muestran los resultados del RMR en cada una de las estaciones.

Estación	Índice RMR	Clase	Calidad
MU-01	75	II	Buena
MU-02	79	II	Buena
MU-03	79	II	Buena
MU-04	79	II	Buena

Tabla 3. Clasificación del macizo rocoso en relación al índice RMR en la presa de El Multo.

La clasificación DMR, fue desarrollada por Manuel Romana[11] y está diseñada específicamente para realizar una clasificación preliminar sobre la cimentación de las presas, al tener en cuenta la dirección y buzamiento de los estratos en función de la dirección del eje de la presa. En la Tabla 4 se muestran los resultados de la clasificación DMR:

Estación	RMR_{BD}	CF	R_{STA}	DMR_{STA}
MU-01	75	0.001	-2	75
MU-02	79	0.001	-2	79
MU-03	79	0.050	-2	79
MU-04	79	0.05	-2	79

Tabla 4. Clasificación de la estabilidad de la presa en función del índice DMR en la presa de El Mulato.

El módulo de elasticidad del terreno puede estimarse a partir del índice RMR empleando la correlación presentada por Serafim y Pereira[12]

$$E_m(GPa) = 10^{\frac{(RMR-10)}{40}} \quad (19)$$

Sin embargo, esta correlación tiende a sobreestimar el valor del módulo de elasticidad. Por ello, partiendo de los resultados de los ensayos realizados en la presa de La Gambuesa, cimentada en un terreno de características similares al de la cerrada estudiada, que pueden consultarse en el Anejo 2, se realizará una correlación con los resultados del RMR para estimar de forma más realista el módulo de elasticidad. De este modo se estima un módulo de elasticidad con un valor de 18 500 MPa para el cimiento de la presa de Ayagaures y el coeficiente de Poisson se fija en 0.28.

En cuanto a la densidad y los parámetros resistentes del macizo de cimentación, también se toma como referencia los resultados de los ensayos realizados en la presa de La Gambuesa, por lo tanto, puede afirmarse que la densidad de este tipo de terreno se encuentra definida entre 1940 y 2540 kg/m^3, adoptándose una densidad de 2300 kg/m^3 para este estudio. La resistencia a tracción se establece en 2.7 MPa y la de compresión se establece en 27.6 MPa.

[11] Romana, Manuel. 2003. «DMR, a new geomechanics classification for use in dam foundations, adapted from RMR». 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, 1-9.
Romana, Manuel. 2003. «DMR (Dam Mass Rating). An Adaptation of RMR Geomechanics Classification for Use In Dams Foundations». 10th ISRM Congress, 1-4.

[12] Serafim, y Pereira. 1983. «A discussion on the uniaxial compressive strength of satured and dry rock samples. Consideration of the geomechanical clasification of Bieniawski».

Aunque en el modelo, la cimentación se ha modelizado empleando un modelo elástico y lineal, se han estimado los parámetros plásticos tanto de la matriz rocosa como del propio macizo. La estimación de los parámetros plásticos de la matriz rocosa se realiza a partir de las correlaciones de Hoek, Carranza-Torres y Corkum[13]:

$$\phi' = sen^{-1}\left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}\right] \quad (20)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci}[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma'_{3n}](s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+\frac{6am_b(s+m_b\sigma'_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (21)$$

A partir de la formulación anterior, se obtiene una cohesión de 23.50 MPa y un ángulo de rozamiento de 63.50º.

Para el macizo rocoso, siguiendo las recomendaciones de Bieniawski[14], se estima a partir del RMR una cohesión de 1.0 MPa y un ángulo de rozamiento de 45º.

8.2. Caracterización de la presa

Como se ha comentado la presa tiene un cuerpo mixto, donde los primeros 20 metros están formados por mampostería basáltica y el resto por hormigón en masa de cemento puzolánico-350.

Puesto que se desconocen las características de la mampostería basáltica se ha decidido aplicar las definidas en la presa de El Vaquero al tener la misma naturaleza, datar de fechas próximas de construcción y encontrarse aproximadamente a 15 km de distancia. De esta forma, se obtiene una resistencia a compresión de 12.7 MPa y una resistencia a tracción de 0.64 MPa.

El módulo de elasticidad se fija en 12 700 MPa y el Coeficiente de Poisson en 0.33.

Respecto al hormigón en masa, en el Documento XYZT Presa El Mulato se recoge una resistencia promedio a compresión del hormigón de 17.6 MPa. A partir de la resistencia a compresión puede estimarse la resistencia a tracción como[15]:

$$f_{ctm} = 0.30 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad (22)$$

De esta forma, se estima una resistencia media a tracción del hormigón de 2 MPa. De igual modo, el módulo de elasticidad secante, se obtiene como:

$$E_{cm} = 8500\sqrt[3]{f_{cm}} \quad (23)$$

De esta forma, se obtiene un módulo de elasticidad del hormigón de 22 100 MPa, Por otro lado, el Coeficiente de Poisson se fija en 0.20.

[13] Hoek, Evert, C. Carranza-Torres, y B. Corkum. 2002. «El criterio de rotura de Hoek-Brown – Edición 2002». En Proceedings of NARMS- TAC 2002, Mining Innovation and Technology. Toronto, editado por R. Hammah, W. Bawden, J. Curran, y M. Telesnicki, 267-73. Toronto.

[14] Bieniawski, Zdzisław Tadeusz. 1989. Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering. Wiley.

[15] Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE - 08).

8.3. Caracterización del contacto

La estimación de las características resistentes del contacto, se ha realizado partiendo de distintas referencias debido a la dificultad de obtener muestras inalteradas de un contacto. En el reporte de Seguridad frente al deslizamiento de las presas de gravedad existente del Club Europeo de ICOLD[16] se recogen las siguientes conclusiones al respecto:

- **Resistencia a la tracción**: El contacto entre el hormigón y la roca muestra una resistencia a la tracción significativa, del orden de 0.8-1.0 MPa, superior al 60% de la resistencia del hormigón monolítico.
- **Resistencia cortante**: El ajuste de distintos ensayos de contactos entre el hormigón y la roca, muestra rangos de valores de cohesión entre 0.3 – 1.9 MPa y ángulos de rozamiento entre 53º – 68º para resistencias pico; y valores de cohesión entre 0 – 0.2 MPa y ángulos de rozamiento entre 13 – 39º para resistencia residual.

En base a esto se decide emplear una resistencia a tracción del 60% del material del cuerpo de presa, limitada a un máximo de 0.8 MPa; y un ángulo de rozamiento de 40º asociado a una cohesión de 0.4 MPa.

8.4. Caracterización del contacto entre bloques

La estimación de las características resistentes del contacto entre los bloques, se ha realizado partiendo de distintas referencias debido a la dificultad de obtener datos en las juntas verticales entre bloques. La caracterización de estas juntas se ha realizado a partir de lo expuesto en Ruggeri[17], donde se obtuvieron las siguientes conclusiones:

La resistencia a tracción entre las juntas de hormigón muestra una resistencia a tracción del orden de 1.2 MPa.

Respecto a la resistencia a cortante, el análisis de distintos ensayos en juntas muestra rangos de valores de cohesión entre 0.5 – 2.1 MPa y valores de cohesión entre 49º – 57º.

En base a dicha literatura se ha decidido emplear una resistencia a tracción en la interfaz entre bloques igual a 1.2 MPa, un ángulo de rozamiento de 49º y una cohesión de 0.5 MPa.

8.5. Resumen de parámetros resistentes y tenso-deformacionales

En la Tabla 5 se resumen los parámetros resistentes y tenso-deformacionales adoptados para el modelo de la presa.

[16] Working Group on Sliding Safety of Existing Gravity Dams. ICOLD European Club. 2004. Sliding Safety of Existing Gravity Dams - Final Report.
[17] Ruggeri, Giovanni. Chairman of the European Working Group. 2004. Sliding Safety of Exiting Gravity Dams – Final Report

	Presa		Cimiento	Contacto	
Material	Mampostería basáltica	Hormigón en masa	Ignimbritas	Presa-terreno	Bloques
Densidad [kg/m^3]	2300	2300	2300	-	-
Mod. Elasticidad [MPa]	12 700	22 000	18 500	-	-
Coef. Poisson	0.33	0.20	0.28	-	-
R. Tracción [MPa]	0.64	2.00	2.70	0.38	1.20
Cohesión [MPa]	1.40	3.00	1.00	0.40	0.50
Rozamiento [MPa]	55.00	53.00	45.00	40.00	40.00

Tabla 5. Resumen de parámetros resistentes y tenso-deformacionales empleados en el modelo.

9. RESULTADOS

9.1. 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 Figura 32, 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 Figura 32 son todos positivos.

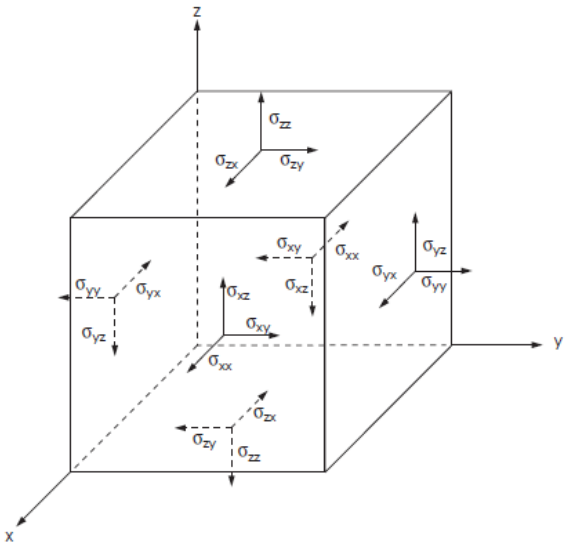


Figura 32. Criterio de signos para esfuerzos positivos.

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 6 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 6. 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.

9.2. Análisis tenso-deformacional y resistente

El análisis tenso-deformacional y resistente de la presa se realiza para los cuatro modelos descritos anteriormente (M2D-C, M2D-E, M3D-Simpl 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 en cimentación.
- Máxima compresión en cimentación.
- 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. El resto de resultados se puede observar en el Anejo 3: Resultados.

9.2.1. 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.

En el modelo tridimensional completo, aparecen tracciones en el cuerpo de la presa en el entorno de los 0.10 MPa, estas tracciones son poco representativas ya que provienen de la compatibilización de desplazamientos entre el terreno y la estructura. Por otro lado, las máximas compresiones en el modelo simplificado alcanzan los 2 MPa las cuales se ven disminuidas en el modelo tridimensional completo hasta los 0.60 MPa. Los resultados tensionales se muestran en las Figura 33 y Figura 34.

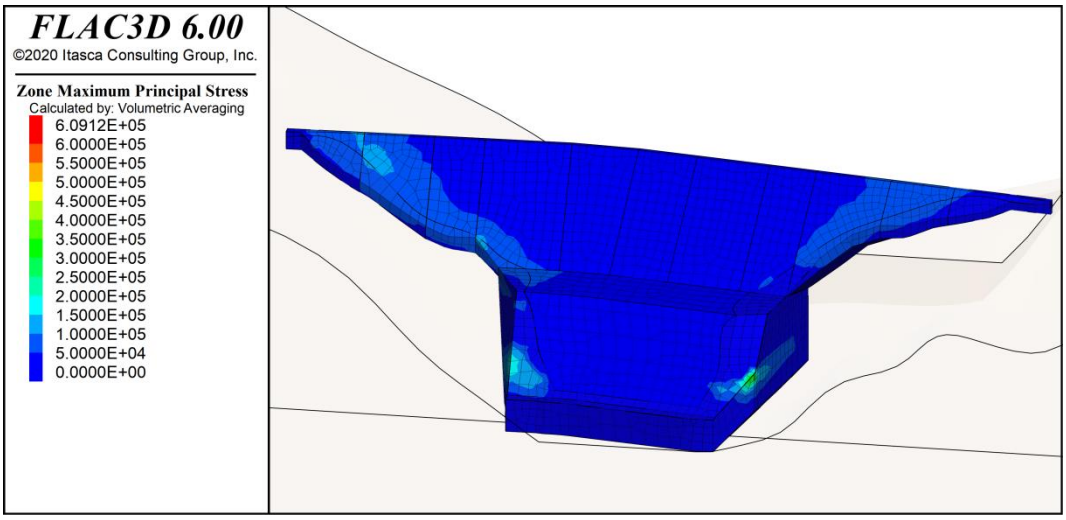


Figura 33. Embalse vacío. Tensiones principales máximas.

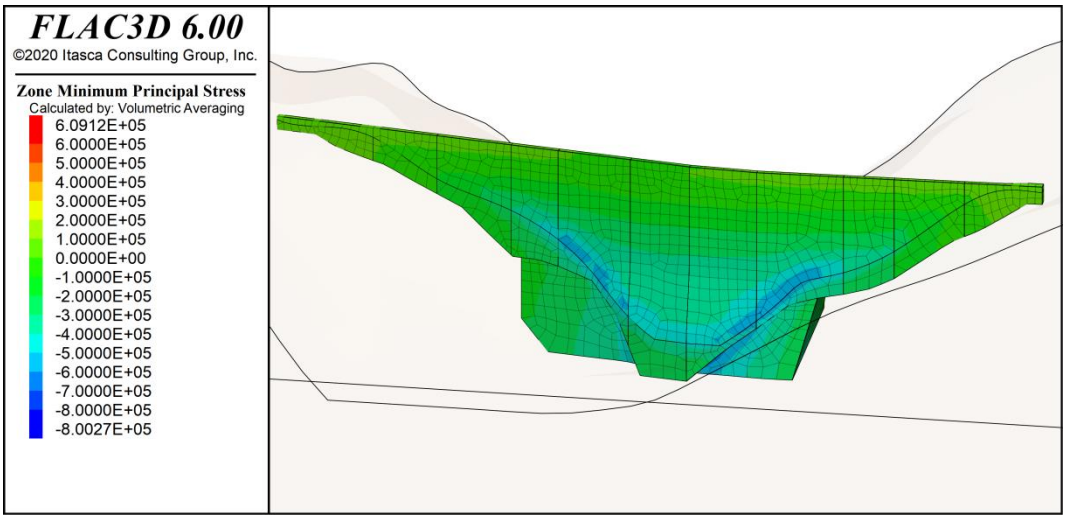


Figura 34. Embalse vacío. Tensiones principales mínimas.

Respecto a las tensiones en el contacto presa-cimiento, se observa en la Figura 35 que toda la base está comprimida, alcanzando unos valores máximos de 1.30 MPa en el modelo bidimensional. Este valor se ve disminuido en los modelos tridimensionales hasta los 0.70 MPa debido principalmente a la distribución de tensiones tanto en sentido longitudinal como transversal.

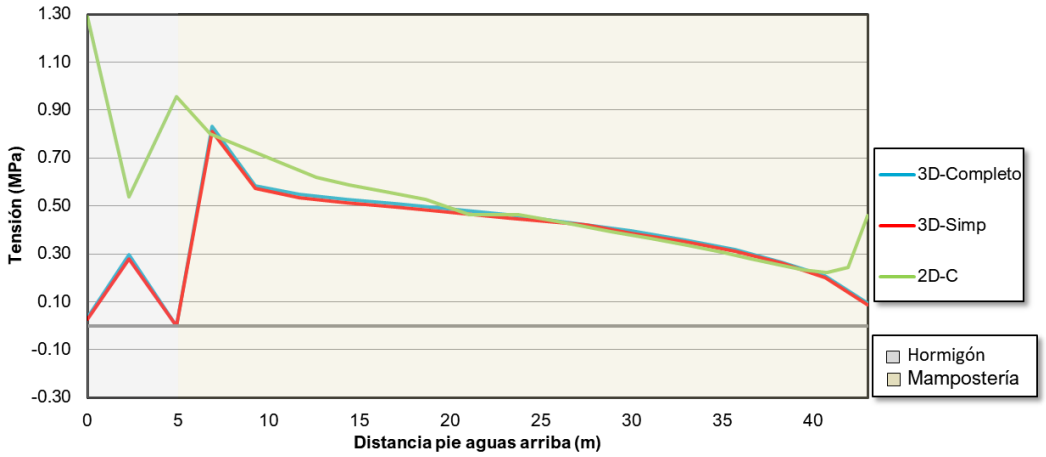


Figura 35. Embalse vacío. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.

Respecto a los desplazamientos, se observa un desplazamiento vertical en coronación inferior a un milímetro. Por último, en la Tabla 7 se resumen los resultados de la simulación a peso propio.

EMBALSE VACÍO				
	M2D-C	M2D-E	M3D-Simp	M3D-C
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.15	0.00	0.00	0.10
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	1.00	0.30	2.00	0.60
Máxima Tracción en Cimentación (MPa)	0.00	0.00	0.25	0.20
Máxima Compresión en Cimentación (MPa)	0.90	0.20	2.00	1.00
Máxima Tracción VERTICAL en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.00	0.00	0.00	0.00
Máxima Compresión VERTICAL en el contacto presa-cimiento (MPa)	1.29	0.41	0.81	0.83
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	1.2E-03	1.0E-04	7.4E-04	6.4E-04
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	1.0E-03	1.7E-04	6.0E-04	8.0E-04

Tabla 7. Embalse vacío. Resumen de los resultados.

9.2.2. Embalse en coronación (N 741.30 m s.n.m.) + subpresión

A continuación, se analizan los resultados obtenidos a embalse de coronación. Estos resultados corresponderían con el escenario de embalse al umbral de aliviadero, dado que la cota del umbral del aliviadero es coincidente con coronación.

En este caso, las tracciones máximas se ven disminuidas hasta los 0.05 MPa y las compresiones máximas en el modelo tridimensional completos aumentan hasta los 0.70 MPa. Los resultados tensionales se muestran en las Figura 36 y Figura 37.

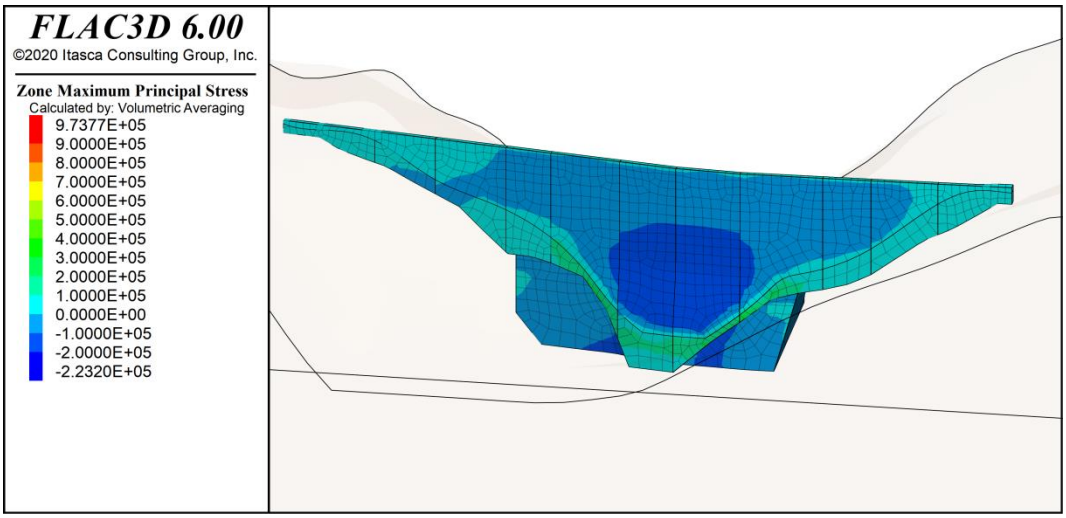


Figura 36. Embalse a umbral de aliviadero (N 741.30 m.s.n.m.) + subpresión. Tensiones principales máximas.

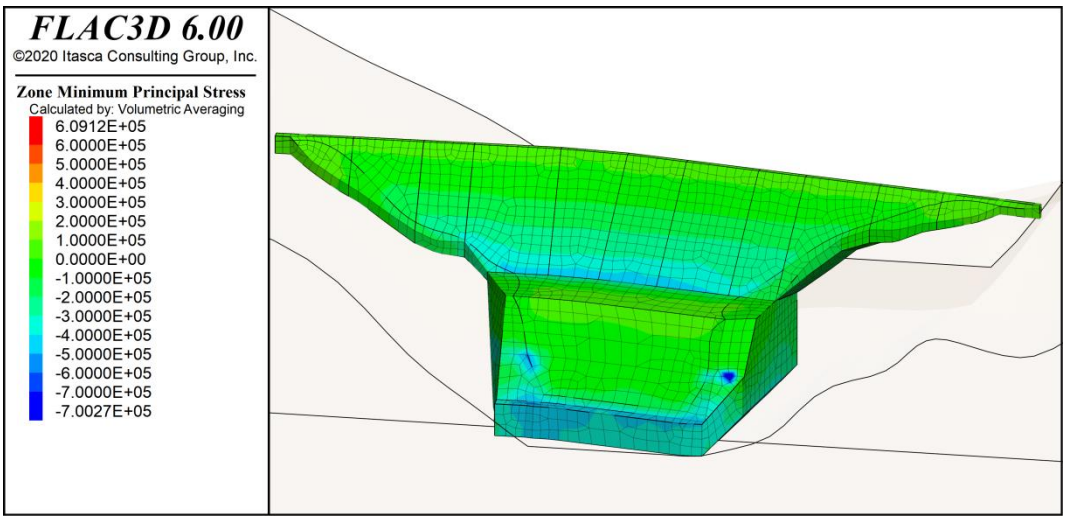


Figura 37. Embalse a umbral de aliviadero (N 741.30 m s.n.m.) + subpresión. Tensiones principales mínimas.

Respecto a las tensiones en el contacto presa-cimiento, en los modelos tridimensionales, no se observa un aumento significativo de las compresiones con respecto al escenario anterior. Respecto a las tracciones se observa la aparición de las mismas en el modelo bidimensional, sin embargo, estas desaparecen en los modelos tridimensionales a causa de la distribución de tensiones tanto en sentido longitudinal como transversal. Esta distribución de tensiones se observa en la Figura 38.

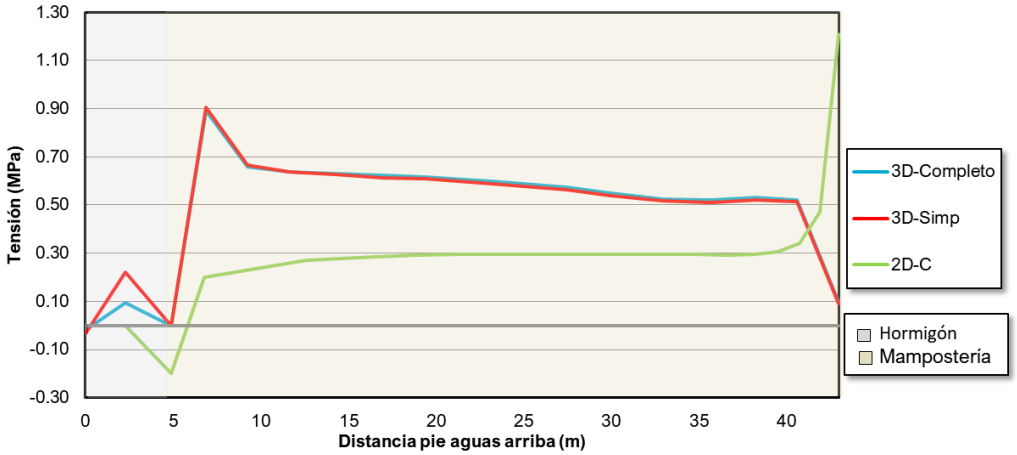


Figura 38. Embalse en coronación (N 741.30 m s.n.m.) + subpresión. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento.

Respecto a los desplazamientos, no se observa un incremento notable con referencia al escenario anterior.

A continuación en la Tabla 8, y a modo de resumen, se muestran los resultados obtenidos de la simulación a embale en cota de coronación:

EMBALSE CORONACIÓN (741 m s.n.m.) + SUBPRESIÓN				
	M2D-C	M2D-E	M3D-Simp	M3D-C
Máxima Tracción Cuerpo de Presa (MPa)	0.02	0.00	0.20	0.05
Máxima Compresión Cuerpo de Presa (MPa)	0.95	0.34	2.00	0.70
Máxima Tracción en Cimentación (MPa)	0.00	0.00	0.25	0.10
Máxima Compresión en Cimentación (MPa)	1.00	0.30	1.75	1.20
Máxima Tracción VERTICAL en el contacto presa-cimiento (MPa)	0.20	0.06	0.02	0.03
Máxima Compresión VERTICAL en el contacto presa-cimiento (MPa)	1.21	0.43	0.89	0.90
Máximo desplazamiento horizontal en coronación (m)	1.2E-03	1.9E-04	2.0E-04	6.0E-04
Máximo desplazamiento vertical en coronación (m)	1.0E-03	8.0E-05	1.0E-04	7.0E-04

Tabla 8. Embalse en coronación (N 741.30 m s.n.m.) + subpresión. Resumen de los resultados.

9.3. Aproximación al margen de seguridad resistente

9.3.1. Escenario 1. Variación de la cohesión, fricción y tracción

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

	Mampostería basáltica			Hormigón en masa			Coef. Reductor
	c/C_R	$\tan\varphi/C_R$	σ_T/C_R	c/C_R	$\tan\varphi/C_R$	σ_T/C_R	
	c (MPa)	φ (º)	σ_T	c (MPa)	φ (º)	σ_T	
Caso Base	1.40	55.00	0.64	3.00	53.00	2.00	1.00
Escenario 1A	0.70	35.53	0.32	1.50	33.57	1.00	2.00
Escenario 1B	0.47	25.46	0.21	1.00	23.86	0.67	3.00
Escenario 1C	0.40	22.20	0.18	0.86	20.76	0.57	3.50
Escenario 1D	0.35	19.65	0.16	0.75	18.35	0.50	4.00
Escenario 1E	0.31	17.61	0.14	0.67	16.43	0.44	4.50
Escenario 1F	0.28	15.94	0.13	0.60	14.86	0.40	5.00
Escenario 1G	0.25	14.56	0.12	0.55	13.57	0.36	5.50
Escenario 1H	0.23	13.39	0.11	0.50	12.47	0.33	6.00

Tabla 9. Casos planteados para el Escenario 1: Variación de la cohesión, fricción y tracción.

Como se puede observar en Figura 39 y Figura 40, a partir del escenario 1A (coeficiente reductor igual a 2) comienzan a observarse un conjunto de elementos plastificados, llegando a formar un plano de debilidad en el pie aguas arriba. Por otro lado, a partir de un coeficiente reductor de 5 (Escenario 1F), comienza a observar un conjunto de elementos plastificados en el pie aguas arriba en la transición entre el hormigón y la mampostería.

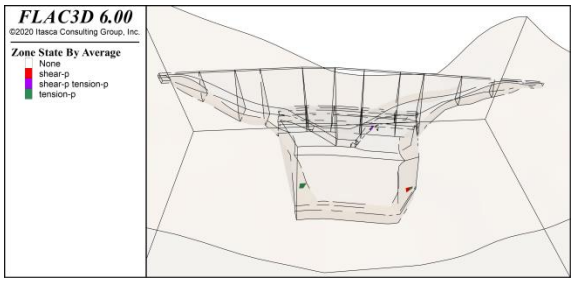
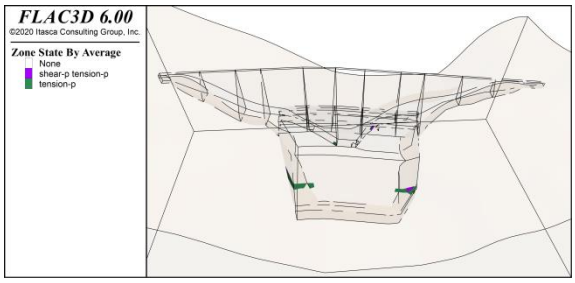
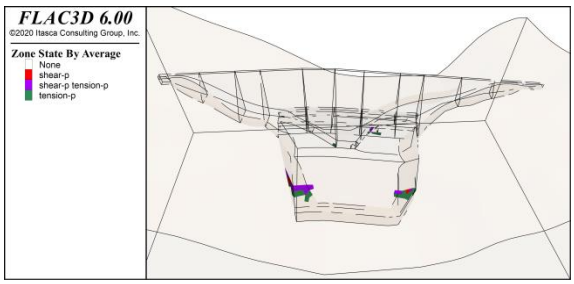
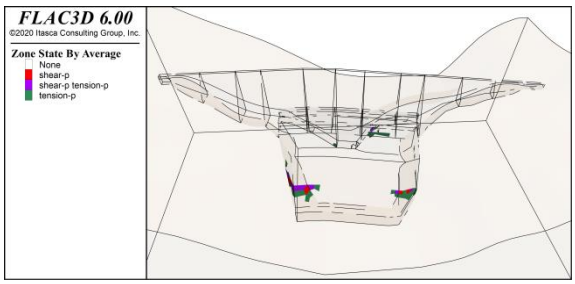
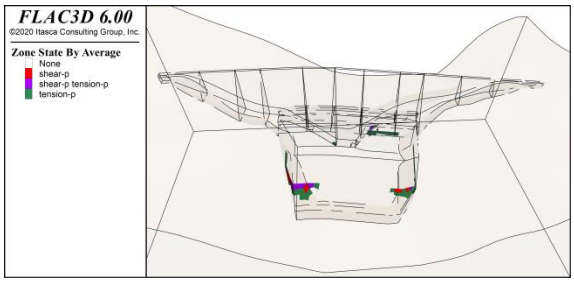
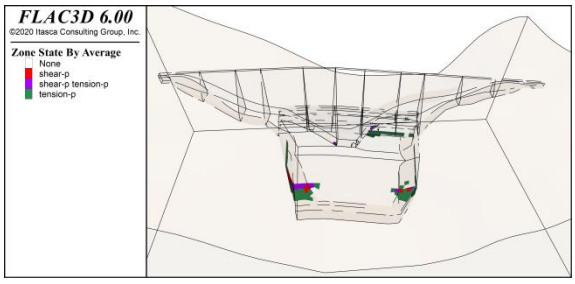
Caso Base (Coef. Reductor= 1)	Escenario 1A (Coef. Reductor= 2.00)
	
Escenario 1B (Coef. Reductor= 3.00)	**Escenario 1C (Coef. Reductor= 3.50)**
	
Escenario 1D (Coef. Reductor= 4.00)	**Escenario 1E (Coef. Reductor= 4.50)**
	

Figura 39. Resultados obtenidos de la variación de la cohesión, fricción y tracción (I/II).

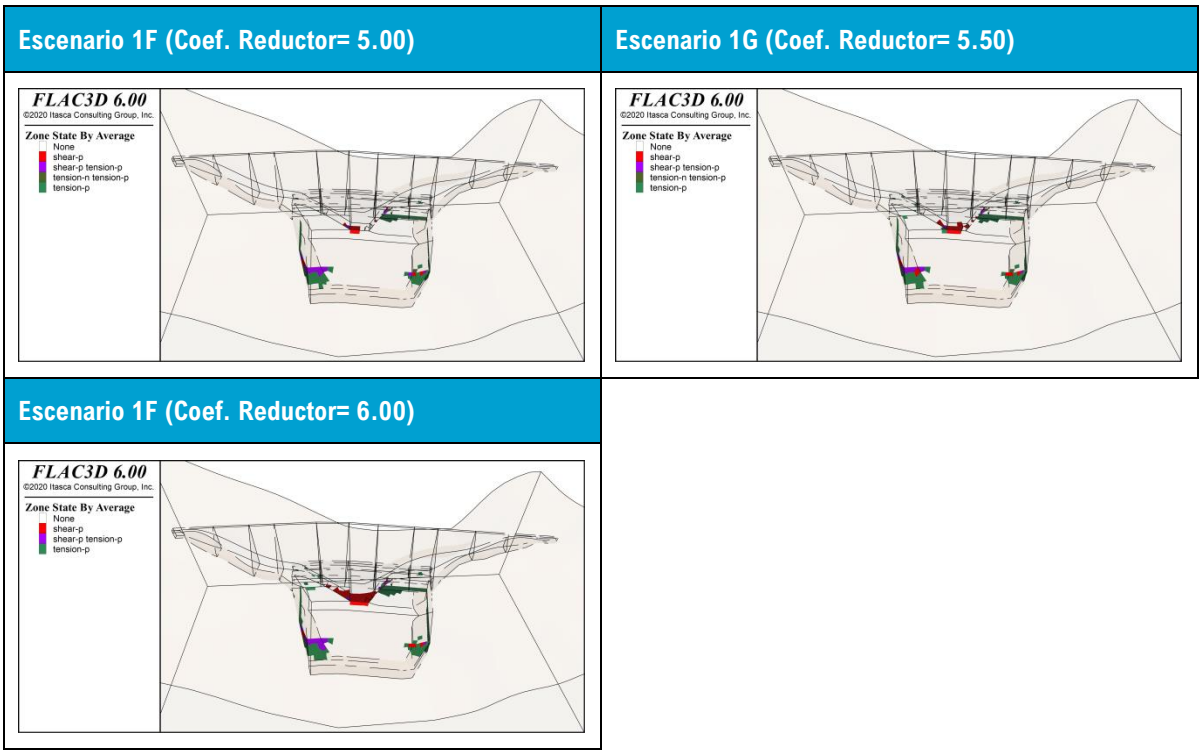


Figura 40. Resultados obtenidos de la variación de la cohesión, fricción y tracción (I/II).

9.3.2. 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 escenarios planteados se observan en la Tabla 10.

	Nivel	Sobrevertido
Caso Base	741.00	0
Escenario 2A	745.00	4
Escenario 2B	750.00	9
Escenario 2C	755.00	14
Escenario 2D	760.00	19
Escenario 2E	765.00	24
Escenario 2F	770.00	29
Escenario 2G	775.00	34

Tabla 10. Casos planteados para el Escenario 2: Incremento progresivo del nivel de embalse.

En este caso, comienzan a observarse un conjunto de elementos plastificados significativos en el escenario 2E, con un sobrevertido de 24 m sobre el nivel de coronación, es ya en el escenario 2F, cuando comienza a observarse un potencial plano de plastificación en el pie aguas arribas de la presa. Al igual que ocurría en el caso anterior, este plano se forma en la transición entre el hormigón y la mampostería. Estos resultados se observan en la Figura 41.

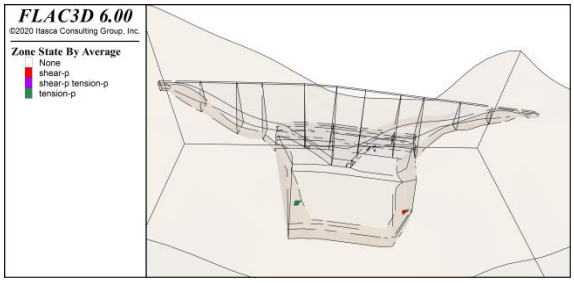
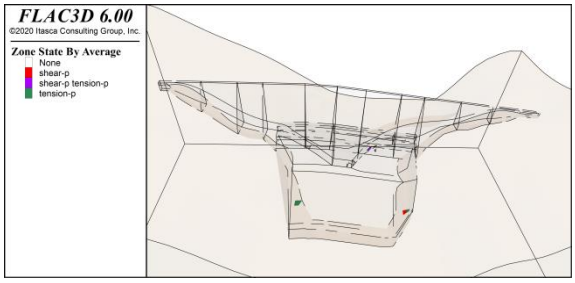
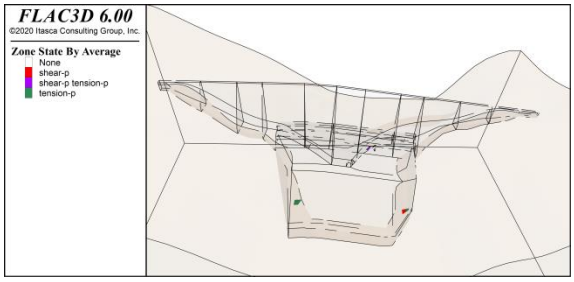
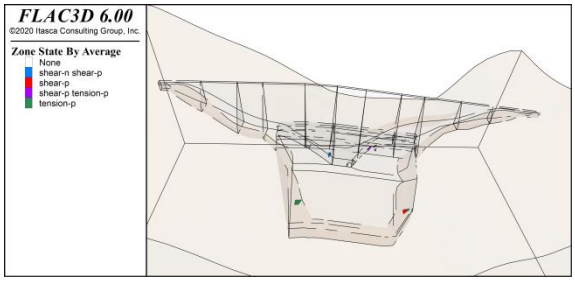
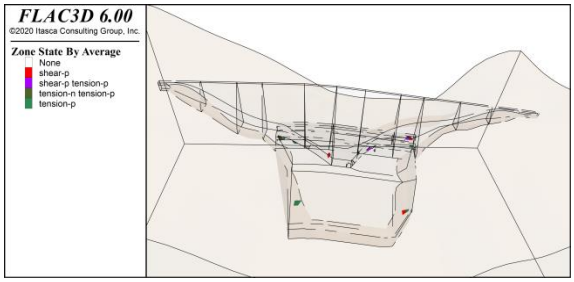
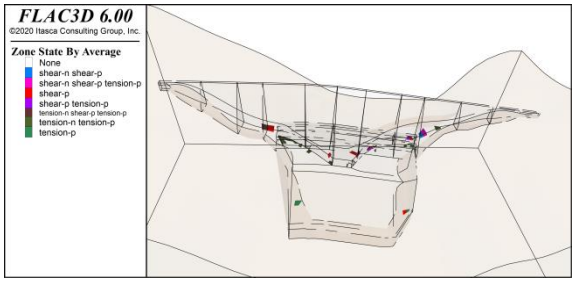
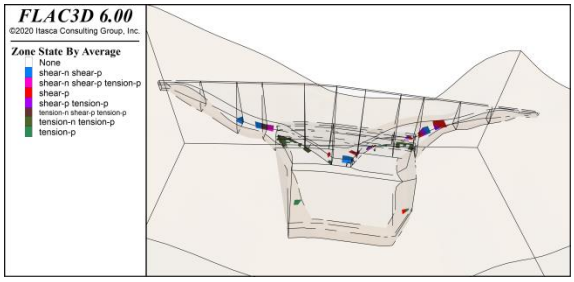
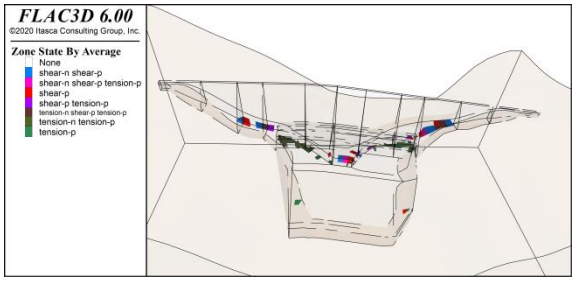
Caso Base	Escenario 2A (Sobrevertido = 4m)
	
Escenario 2B (Sobrevertido = 9m)	**Escenario 2C (Sobrevertido = 14m)**
	
Escenario 2D (Sobrevertido = 19m)	**Escenario 2E (Sobrevertido = 24m)**
	
Escenario 2F (Sobrevertido = 29m)	**Escenario 2G (Sobrevertido = 34m)**
	

Figura 41. Resultados obtenidos del incremento progresivo del nivel de embalse.

9.3.3. 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 7.2.2,* obteniendo los valores de rigidez que se muestran en Tabla 11.

	Rigidez relativa	E_{PRESA}	$E_{TERRENO}$
Caso Base	0.69	12 700	18 500
Escenario 3A	4.00	12 700	3,175
Escenario 3B	8.00	12 700	1,588
Escenario 3C	16.00	12 700	793.75

Tabla 11. Casos planteados para el Escenario 3: Rigidez relativa presa-cimiento.

En este caso, y tal y como se muestra en la Figura 42, a partir de una rigidez relativa de 4, se observa un conjunto de elementos plastificados en el pie aguas abajo. Es ya con una rigidez relativa igual a 16 cuando se observa, además, un nuevo conjunto de elementos plastificados en el pie aguas abajo de la presa.

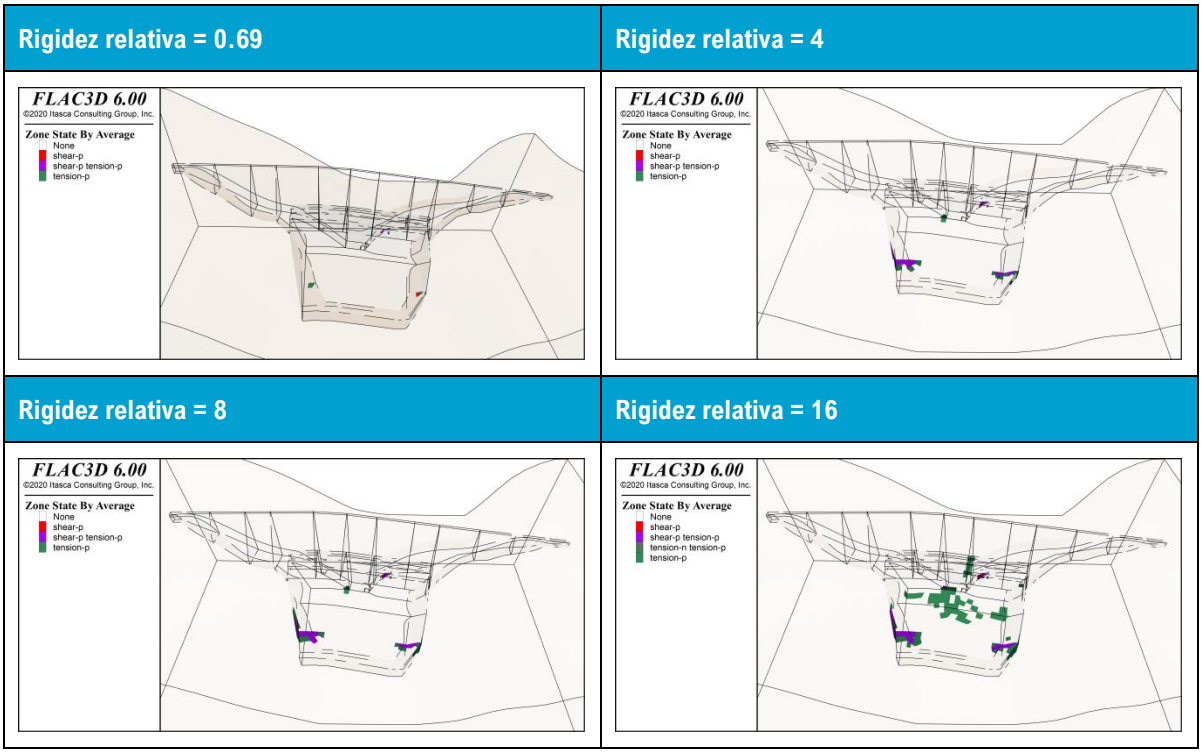


Figura 42. Resultados obtenidos del incremento de rigidez relativa entre la presa y el terreno.

9.3.4. Escenario 4. Resistencia a tracción minorada y subida progresiva 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, tanto del hormigón como de la mampostería, según lo expuesto en el *Apartado 7.2.2.* Por lo que la resistencia a tracción del hormigón resulta igual a 1.40 MPa y la resistencia a tracción de la mampostería se reduce a 0.448 MPa:

$$\sigma_{TH} = 0.7 \cdot 2.00 = 1.40\ MPa \quad (24)$$

$$\sigma_{TH} = 0.7 \cdot 0.64 = 0.448\ MPa \quad (25)$$

Como se puede observar, a continuación en Figura 43, Figura 44 y Figura 45, la minoración de la resistencia a tracción aumenta ligeramente la plastificación de los elementos, a partir de un sobrevertido de 19 m, con respecto a la resistencia a tracción sin minorar. Es ya con un sobrevertido de 24 m donde encontramos un posible plano de plastificación en el pie aguas arriba en la zona de transición entre el hormigón y la mampostería

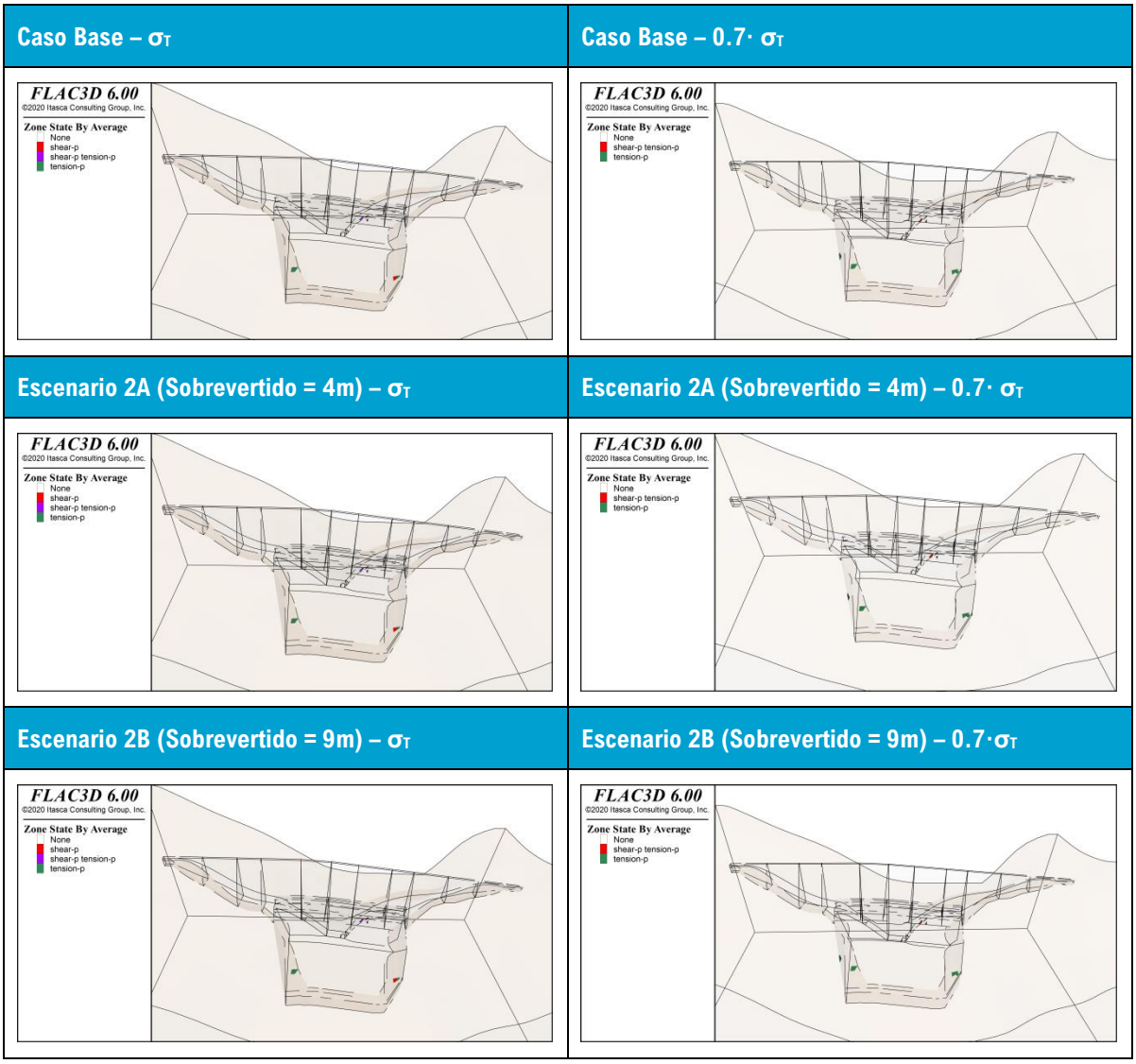


Figura 43. Resultados obtenidos de la resistencia a tracción minorada y el incremento progresivo del nivel de embalse (I/III).

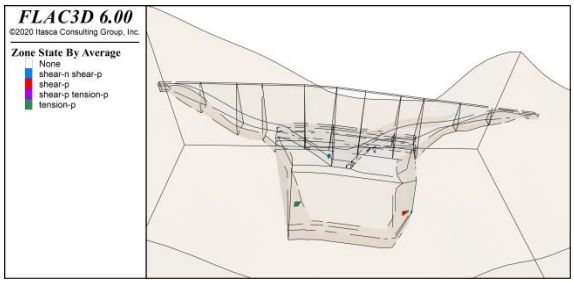
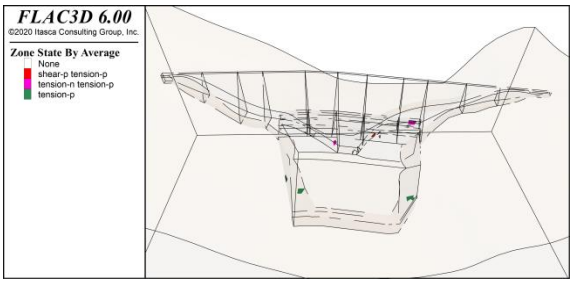
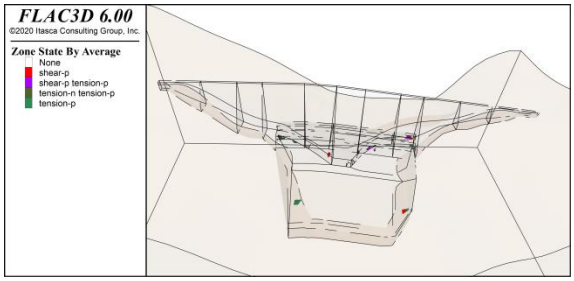
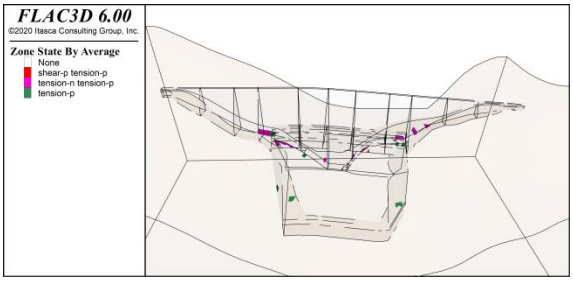
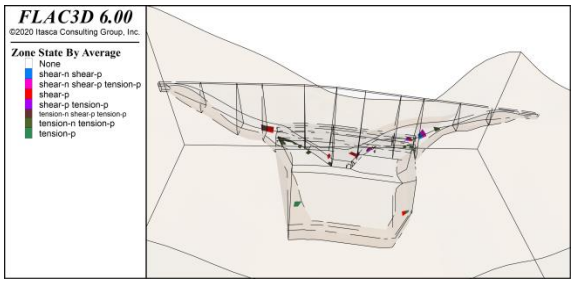
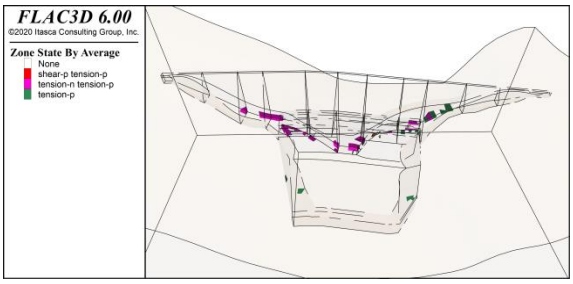
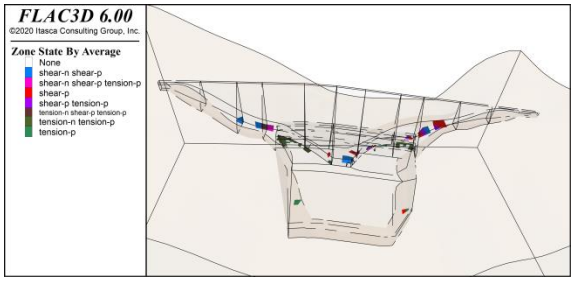
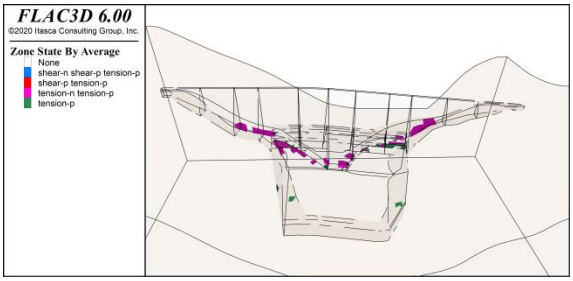
Escenario 2C (Sobrevertido = 14m) – σ_T	Escenario 2C (Sobrevertido = 14m) – $0.7 \cdot \sigma_T$
	
Escenario 2D (Sobrevertido = 19m) – σ_T	**Escenario 2D (Sobrevertido = 19m) – $0.7 \cdot \sigma_T$**
	
Escenario 2E (Sobrevertido = 24m) – σ_T	**Escenario 2E (Sobrevertido = 24m) – $0.7 \cdot \sigma_T$**
	
Escenario 2F (Sobrevertido = 29m) – σ_T	**Escenario 2F (Sobrevertido = 29m) – $0.7 \cdot \sigma_T$**
	

Figura 44. Resultados obtenidos de la resistencia a tracción minorada y el incremento progresivo del nivel de embalse (II/III)

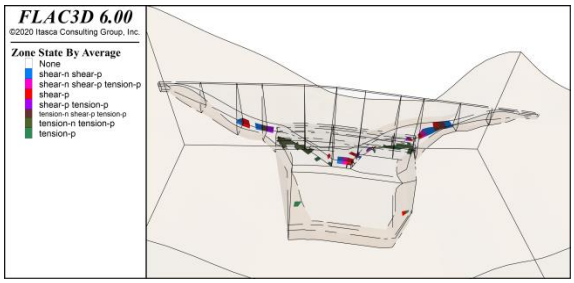
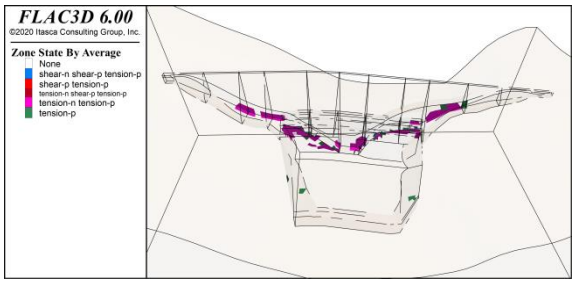
Escenario 2G (Sobrevertido = 34m) – σ_T	Escenario 2G (Sobrevertido = 34m) – 0.7 σ_T
	

Figura 45. Resultados obtenidos de la resistencia a tracción minorada y el incremento progresivo del nivel de embalse (III/III).

PARTE III. MÁRGENES DE SEGURIDAD, AUSCULTACIÓN Y CONCLUSIONES

10. ANÁLISIS DE LA ESTABILIDAD GENERAL

Desde el punto de vista de la estabilidad general, se ha cuantificado el margen de seguridad estimado para cada uno de los modelos confeccionados, añadiéndose un análisis de equilibrio límite para las secciones bidimensionales.

Los coeficientes de seguridad obtenidos se muestran en la Tabla 12.

Hipótesis	Coeficiente de seguridad FLAC 3D				EQ. Límite	
	M3D-C	M3D-Simp	M2D-B	M2D-E	M2D-B	M2D-E
Embalse a cota de coronación + sub	3.33	3.32	3.63	11.78	3.74	4.55

Tabla 12. Coeficientes de seguridad frente a la estabilidad general.

En cualquier caso, por si en el futuro se hiciesen investigaciones de mayor profundidad o mejorasen las técnicas actuales de estimación de parámetros, se han determinado unas curvas límite frente a deslizamiento como se visualiza en Figura 46 con el objetivo de poder obtener diferentes parejas de cohesión y fricción que podrían agotar la estabilidad de la estructura.

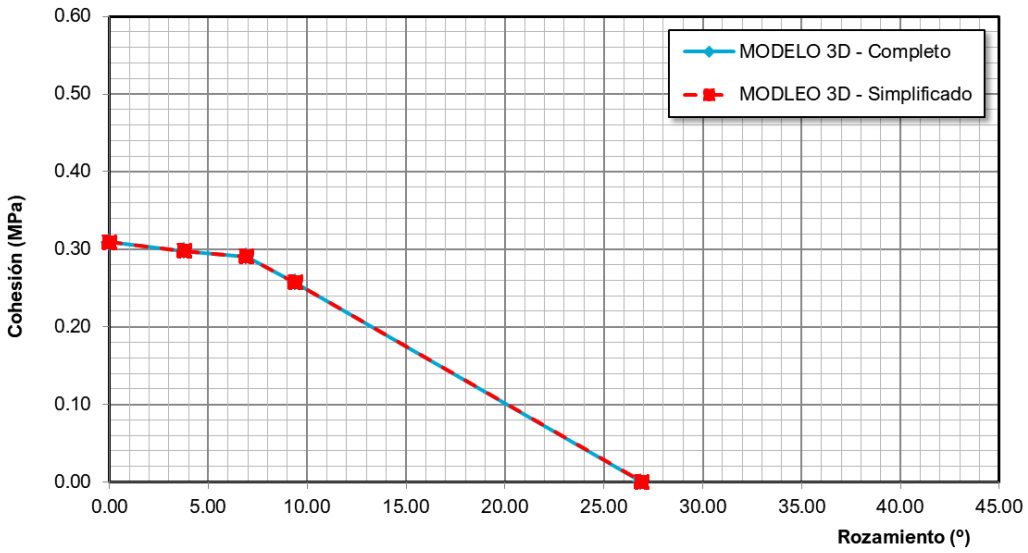


Figura 46. Curvas límite de estabilidad general para embalse a cota de coronación.

Por otro lado, dado que la presa cuenta con un sistema de drenaje inoperativo, se ha analizado un posible escenario futuro con el sistema de drenaje rehabilitado, la rehabilitación del dren se ha modelado según lo defino en el *apartado 7.1.3: Subpresión.*

Este análisis tiene como objetivo analizar el efecto que tendría la rehabilitación del sistema de drenaje en el margen de seguridad resistente de la presa. En Tabla 13 se observa que la disminución de subpresiones en la base supone un efecto relevante en el incremento del margen de seguridad de la presa, esto se observa especialmente en los modelos tridimensionales.

Hipótesis		Coeficiente de seguridad FLAC 3D			EQ. Límite
		M3D-C	M3D-Simp	M2D-B	M2D-B
Embalse al umbral de aliviadero + sub	Dren inoperativo	3.33	3.32	3.63	3.74
	Dren rehabilitado	8.53	12.84	4.64	4.26

Tabla 13. Coeficientes de seguridad frente a la estabilidad general drenaje rehabilitado

Por otro lado, destacar que a pesar de que la rehabilitación del dren provoca un incremento relevante en el margen de seguridad de la presa debido a la reducción de presiones, este no origina un incremento de compresiones en la base puesto que dadas las grandes dimensiones de la base de la cimentación provocan una distribución de las mismas, tal y como se puede observar en Figura 47.

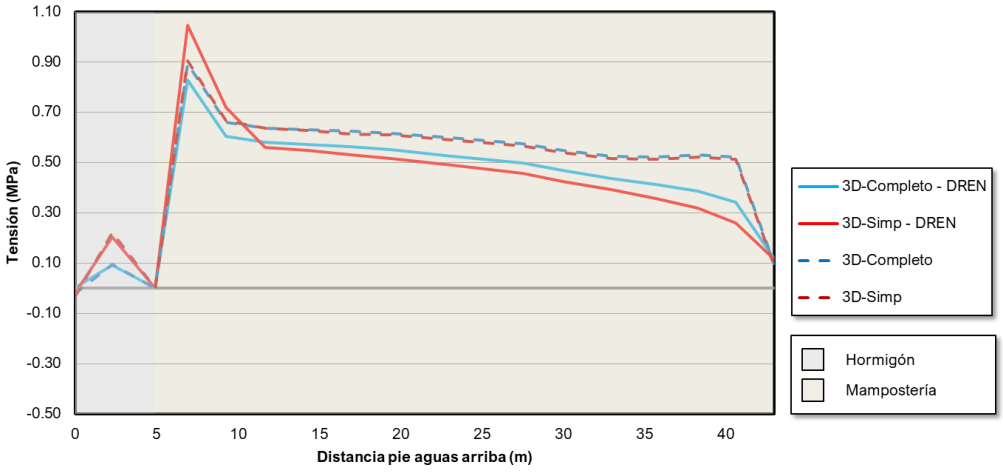


Figura 47. Distribución de tensiones en el contacto presa-cimiento con dren rehabilitado.

Por último, destacar que la normativa española vigente para presas en explotación (NTS3, 2021)[18] conlleva la necesidad de llevar a cabo un análisis y revisión general de la seguridad, trabajos para los cuales los resultados de estos modelos así como los registros de instrumentación de los que se disponga en un futuro (véase el siguiente capítulo) serán un insumo fundamental.

[18] 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

11. PROPUESTA DE AUSCULTACIÓN

A partir de los resultados obtenidos, se propone un plan de auscultación para la presa de El Mulato que tiene por objeto comprobar, de manera automática, el comportamiento de la presa de forma periódica.

Con los equipos de instrumentación propuestos es posible efectuar un seguimiento continuo y preciso de las principales magnitudes que afectan al comportamiento de la presa y su entorno, de manera que pueda ejecutarse cualquier tipo de medida correctora rápida que fuese necesaria y comprobar su efectividad posterior. Al mismo tiempo, por medio del sistema de auscultación instalado, es posible tomar medidas que permitan calibrar correctamente los modelos numéricos realizados y poder emplearlos para predecir el comportamiento «real» de la presa bajo distintos escenarios más particulares.

Las características básicas que condicionan la elección y distribución de los equipos de instrumentación más adecuados para el control de la presa objeto de estudio son las siguientes:

- El estribo izquierdo parece encontrarse en peor estado que el derecho en su parte inferior, sin embargo, la geología no parece presentar características que puedan comprometer la estabilidad general de la presa, por lo que los itinerarios de colimación y nivelación no prestarán especial atención a un estribo en particular.
- El pie de la presa presenta abundante vegetación, lo que parece indicar la presencia de filtraciones a través del cimiento.
- Existen galerías de inspección, lo cual permitirá la instalación de aforadores para controlar las filtraciones y piezómetros para las subpresiones.
- La presa de El Mulato está construida por bloques, por lo que los movimientos relativos de las juntas verticales deberán de ser controlados.

En base a lo anteriormente descrito y al análisis de los potenciales modos de fallo del sistema presa-embalse, las principales variables a controlar en la presa de El Mulato son:

- Variables externas:
  - Nivel de embalse.
  - Variables meteorológicas que afectan al comportamiento del embalse.
- Variables de control:
  - Movimientos superficiales (tanto horizontales como verticales).
  - Subpresiones.
  - Filtraciones.
  - Movimientos relativos en juntas.

Por todo ello, la propuesta de instrumentación es la siguiente:

Estación meteorológica

Permite el control de las magnitudes meteorológicas que influyen directamente en el comportamiento del embalse (como pluviometría, temperatura, presión atmosférica y evaporación). Se recomienda disponer de equipos de lectura manual o automatizada ya presentes en la zona o la colocación de equipos nuevos.

Limnímetro

El nivel de embalse es la principal variable externa que es necesario monitorizar en una presa. Actualmente la presa cuenta con un limnímetro, sin embargo es recomendable comprobar el correcto funcionamiento de este y que sea compatible con la medición en continuo para monitorizar de forma adecuada las subidas y descensos del nivel de embalse.

Movimientos en coronación mediante controles topográficos

Con el objetivo de determinar los movimientos absolutos de la presa, se propone la medición de los movimientos horizontales y verticales de la coronación de la presa, así como en la mampostería. Para ello, se proponen dos tecnologías diferentes, las cuales deberán de valorarse en el momento de realización del plan de instrumentación de la presa.

La primera tecnología, consiste en el empleo de sensores tradicionales de medición de movimientos horizontales y verticales en presas:

Para la medición de los movimientos horizontales, se propone la realización de colimación (control topográfico de alta precisión). Se estima la colocación de una base por bloque y cuatro bases en la mampostería. Además, para la correcta monitorización de los movimientos se debe instalar una base fija para el teodolito, cuya ubicación se ha definido en el estribo derecho.

Por otro lado, la medición de los movimientos verticales se realizará mediante nivelación topográfica de alta precisión. Con un itinerario de puntos móviles equidistantes por la coronación de la presa y la mampostería, y un punto extremo lo suficientemente alejado de la presa para que se pueda considerar fijo.

Cada base de colimación y nivelación va en el interior de una arqueta metálica con tapa que se dejará enrasada con el suelo de la coronación de la presa.

La segunda tecnología, consiste en una nueva tecnología en auge: la tecnología InSAR. Esta tecnología mide los desplazamientos mediante el cálculo de diferencia de fase en píxeles entre dos imágenes SAR capturadas en distintas fechas y desde puntos similares. Proporcionando medidas de exactitud milimétrica.

La tecnología SAR se basa en la adquisición de datos e información a partir de la detección y medición de señales en forma de radiación y campos electromagnéticos.

Esta tecnología es altamente recomendable respecto a métodos convencionales debido a la actualización continua de los datos y a la gran cantidad de puntos de control con los que cuenta, además de resultar más eficientes en costes al no necesitar medidas in-situ. Sin embargo, el único inconveniente con el que cuenta esta tecnología es que para áreas concretas los desplazamientos basados en la auscultación son más efectivos que las técnicas satelitales por lo que en la zona de los estribos de la presa es necesario, como ya se ha dispuesto, de la complementación de medidas mediante topografía de alta precisión.

Control de subpresiones en el cimiento

Dentro de la auscultación hidráulica de una presa de gravedad, la medida de subpresiones bajo el cimiento es un dato esencial, y dada la existencia de galerías longitudinales se propone la instalación de piezómetros de cuerda vibrante en el interior de taladros situados por detrás de la red de drenaje, a lo largo del contacto transversal de la presa.

Como se observa en las Figura 49 y Figura 50, algunas de las perforaciones necesarias para la instalación de los piezómetros han de presentar una notable inclinación, sin embargo esto no presenta un mayor inconveniente aun tratándose de una presa de mampostería; destacando como ejemplo de este tipo de trabajos la presa de Póvoa[19] en Portugal.

Aforo de filtraciones

El control de filtraciones se realizará mediante aforadores locales automáticos en los puntos más significativos, evitando medidas repetitivas y tratando de conseguir la mayor información posible. Por ello, se instalarán aforadores en la entrada de las galerías, para medir filtraciones seccionales, y en la entrada de la toma de agua de la galería inferior con el objeto de recoger todas las filtraciones posibles de la presa.

[19] Bretas, E. M.; Lemos, J. V.; Lourenço, P. B. Hydromechanical Analysis of Masonry Gravity Dams and their Foundations. Rock Mech Rock Eng (2013) 46:327–339.

Movimientos relativos en juntas

Para completar el control de movimientos en la presa, se prevé medir los desplazamientos relativos entre las juntas que separan los bloques. Ello se pretende lograr instalando medidores de juntas tridimensionales automatizados en la intersección de los bloques con las galerías. Esto permitirá obtener los desplazamientos en las tres direcciones principales, ya sea, la abertura o cierre de las juntas o los movimientos en su plano (desplazamiento y cizallamiento).

En las Figura 48, Figura 49 y Figura 50 se muestra de forma esquemática la disposición de los dispositivos de auscultación propuestos.

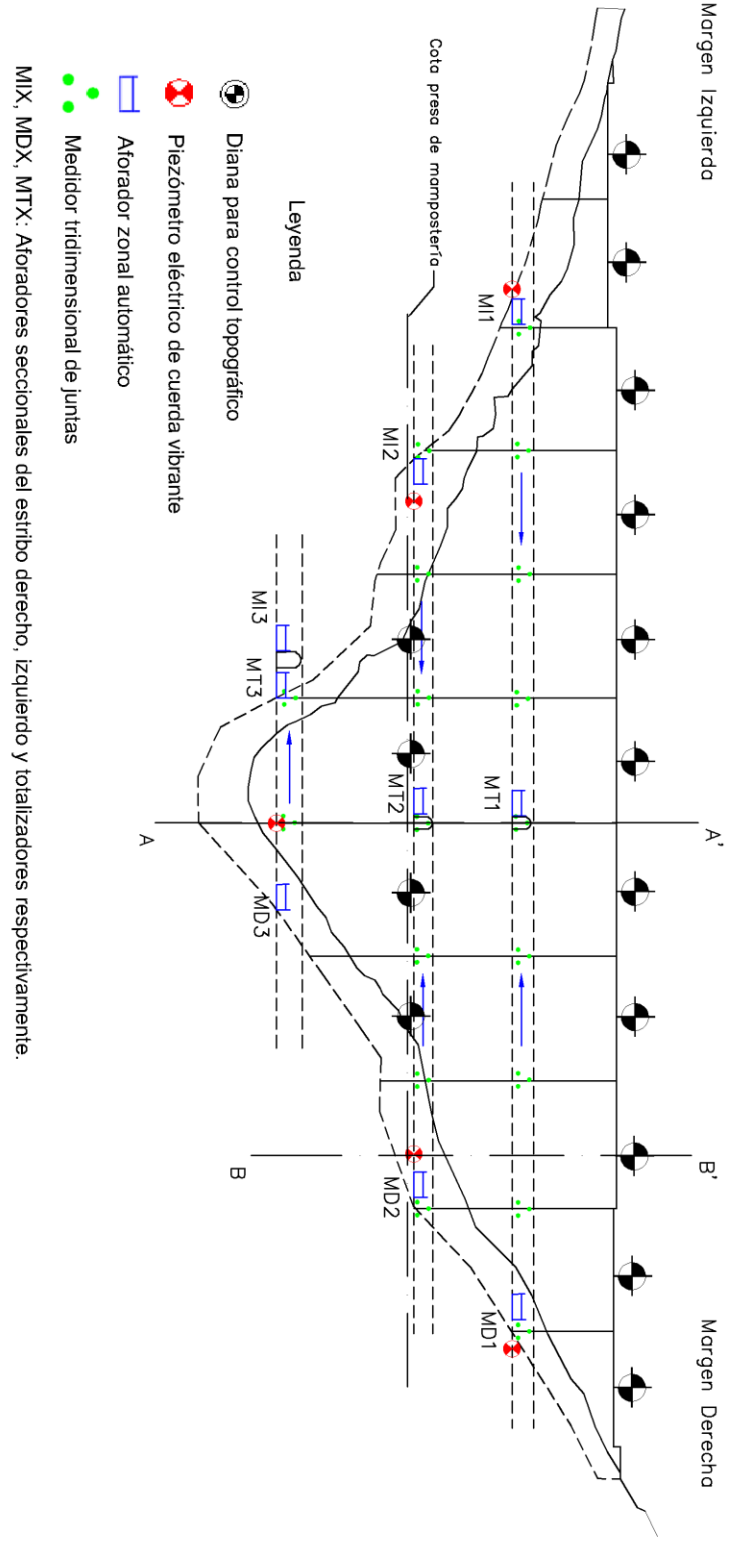


Figura 48. Esquema propuesto auscultación.

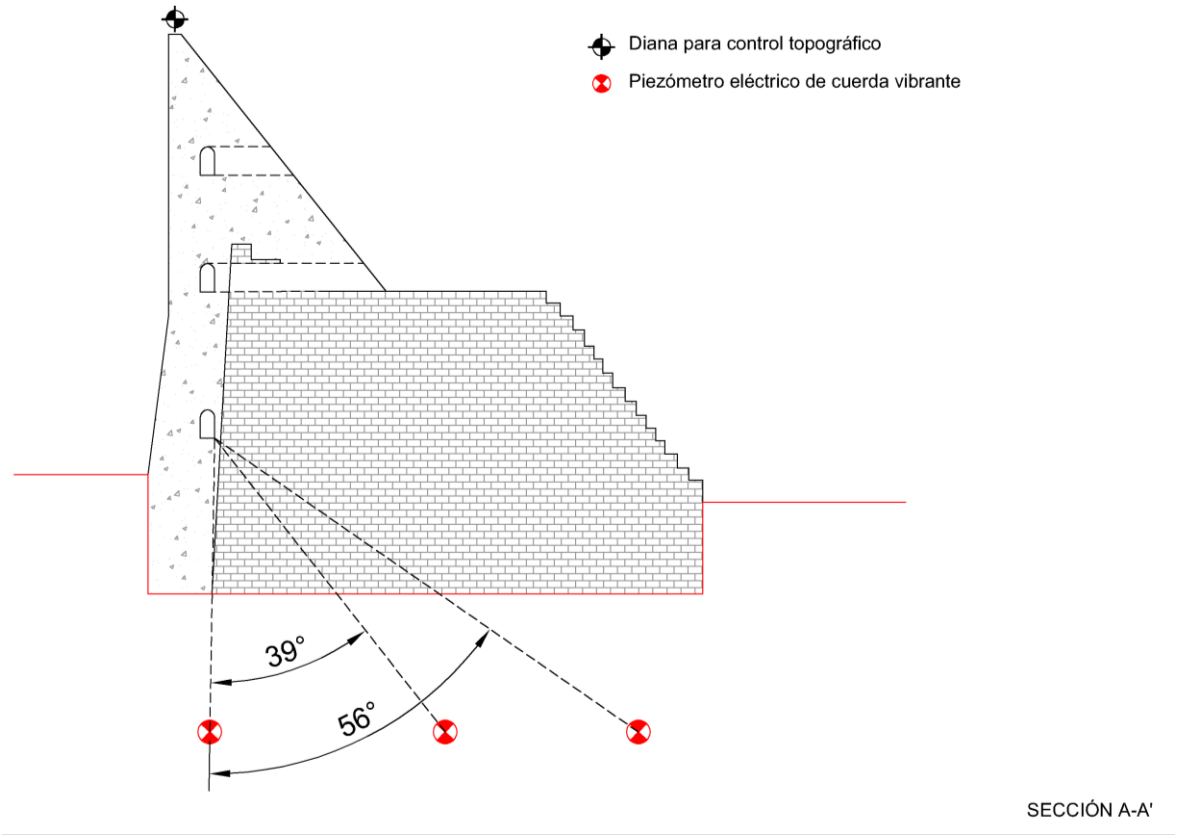


Figura 49. Esquema propuesta auscultación sección A-A'.

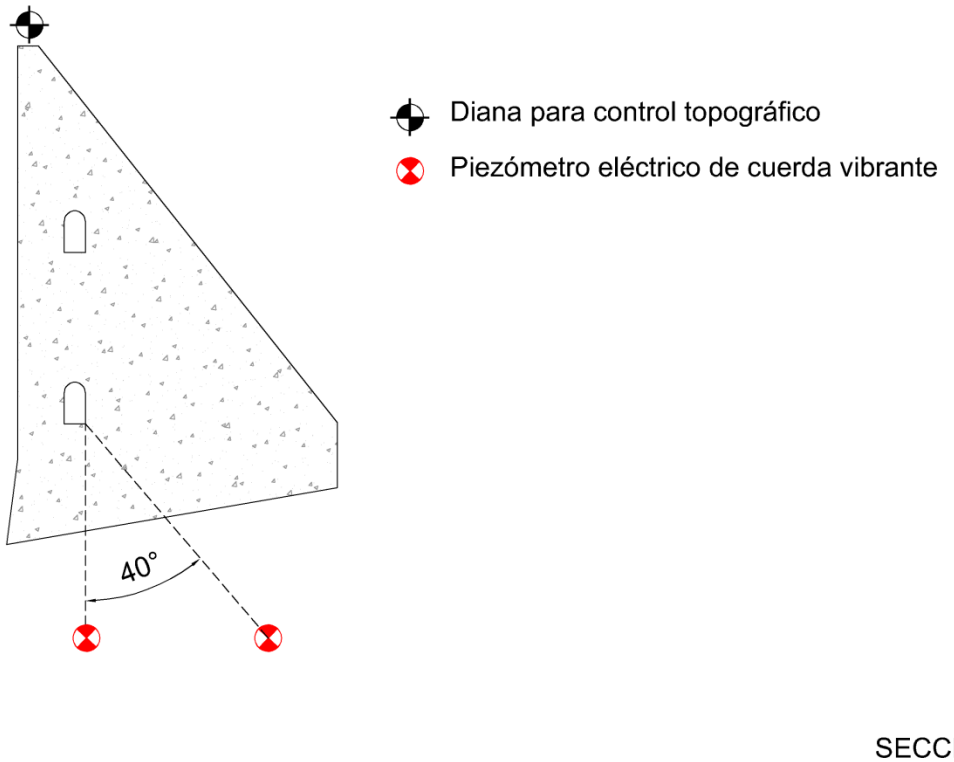


Figura 50. Esquema propuesta auscultación sección B-B'.

12. CONCLUSIONES

A la luz de los resultados obtenidos, así como de los análisis de sensibilidad llevados a cabo, se concluye que la presa presenta un buen comportamiento tenso-deformacional y márgenes de seguridad holgados respecto de su estabilidad general, por lo que estructuralmente se considera segura.

Las medidas de instrumentación y vigilancia servirán para gestionar adecuadamente las presas, resultando en el caso de El Mulato especialmente relevante poder rehabilitar el sistema de drenaje, aforar las filtraciones, disponer de medidas de caracterización de la subpresión, así como de desplazamientos relativos entre bloques de la parte superior de la estructura, de cada uno de los bloques de dicha parte superior y de la estructura inferior, tanto horizontales como verticales.

A su vez, se considera que tanto los modelos realizados como los registros de la futura instrumentación constituirán una base muy robusta para la elaboración de los informes de análisis y evaluación general de la seguridad previstos en la normativa española para presas en explotación (NTS3, 2021)[20], y que permitirán incorporar, entre otros, aspectos hidrológicos e hidráulicos que no eran objeto del alcance de estos trabajos.

[20] 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

PARTE IV. ANEJOS

Anejo 1.
ESTACIONES GEOMECÁNICAS

INFORME Nº: 02/21-10893-18

LABETEC, S.A.

INGENIERÍA Y CONTROL DE CALIDAD

POLÍG. INDUSTRIAL DE ARINAGA. C/ FRAGUA 39; M-1. AGÜIMES. 35118. GRAN CANARIA.

☎ 928 184 213 🖷 928 183 265 ✉ administracion@labetec.es

POLIG. INDUSTRIAL SAN ISIDRO. C/SAN ISIDRO Nº94 GÁLDAR. GRAN CANARIA

http://www.labetec.es

CARACTERIZACIÓN DE ESTACIONES GEOMECÁNICAS

PRESA DEL MULATO - MOGÁN - GRAN CANARIA



PETICIONARIO: INGENIERÍA DE PRESAS, S.L. **FEBRERO 2021**

Laboratorio Acreditado por el Gobierno de Canarias en las Áreas de:

- Control del Hormigón, sus componentes y de las armaduras del acero, **(EHA)**, ref. 08017EHA07
- Control de Firmes Flexibles y Bituminosos en Viales **(VSF)**, con referencia 08017VSF03
- Área de ensayos de laboratorio de geotécnia, **(GTL)**, con referencia 08017GTL07
- Área de sondeos, toma de muestras y ensayos in situ para reconocimientos geotécnicos **(GTC)**, Ref. 08017GTC09
- Área de control de los materiales de fábrica de piezas de hormigón, **(AFH)** ref. 08017AFH08
- Área de control de la soldadura de perfiles estructurales de acero, **(EAS)** ref. 08017EAS08

ÍNDICE

1. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES Y ACCESO. 2

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS AFLORAMIENTOS – EXCAVACIONES. 3

3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA. 8

4. CARACTERIZACIÓN TECTÓNICO-ESTRUCTURAL. 10

5. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA. 12

5.1.- Toma de datos. 12

5.2- Cálculo de índices geomecánicos. 13

5.3.- Determinación de la Clasificación del macizo rocoso por el RMR. 16

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. 20

ANEXOS. Fichas de campo de las Estaciones Geomecánicas.

ANEXO I. Estación Geomecánica MU-01.

ANEXO II. Estación Geomecánica MU-02.

ANEXO III. Estación Geomecánica MU-03.

ANEXO IV. Estación Geomecánica MU-04

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

1. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES Y ACCESO.

La situación de las distintas estaciones geomecánicas se ha realizado mediante equipo portátil de campo, marca *Garmin© modelo GPSmap 62s*. Las mediciones se han tomado en el punto central del área de análisis. En todos los casos, vienen referidas al DATUM WGS 84 y expresadas en unidades UTM (Universal Transversal Mercator).

En total se realizaron 4 estaciones geomecánicas caracterizadas por

Estación	Coordenada X (Oeste)	Coordenada Y (Norte)	Altitud (Z)
MU-01	431347	3088306	753 m
MU-02	431354	3088322	745 m
MU-03	431357	3088351	727 m
MU-04	431367	3088403	734 m

Tres estaciones se midieron en el apoyo oeste de la presa y una cuarta en el apoyo oriental.



Figura 1.- Localización de estaciones geomecánicas en la presa del Mulato (imagen Google,2020)

Los accesos de las estaciones MU-01, MU-02 Y MU-03 se realizan directamente por el camino de servicio al muro de la presa. El acceso a la estación MU-04 se realiza cruzando la presa por el muro.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

2. CARACTERIZACIÓN DE LOS AFLORAMIENTOS – EXCAVACIONES.

Las estaciones MU-01, MU-02 y MU-03 se consideran como parte del mismo macizo rocoso sobre el que se apoya el muro de la presa en el sector occidental, pero a diferente cota, mientras que el MU-04 representa las condiciones de afloramiento del macizo de roca en su apoyo oriental.

El primer conjunto de estaciones (MU-01, MU-02 y MU-03) son distintos afloramientos de ignimbritas soldadas, en el que contrasta la fuerte alteración por meteorización que presenta el MU-01). En los dos restantes, MU-02 y MU-03, la calidad de roca mejora claramente, dado que se corresponden con excavaciones mecánicas o con explosivos que hacen aflorar las ignimbritas que están debajo de las afectadas por meteorización superficial.

En el caso de la estación **MU-01**, los datos de caracterización de la estación geomecánica se han tomado en un talud junto a la senda por la que se accede al muro de la presa. Es evidente la alteración generaliza de la ignimbrita en superficie (Fig.2 y 3).



Figura 2.- Estación Geomecánica MU-01.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A



Figura 3.- Estación Geomecánica MU-01. Aspecto de la roca y fracturación

La estación **MU-02** se localiza según desciende por la citada senda hacia el muro de la presa. En este punto se observa que la roca fue excavada, probablemente en fases constructivas (Fig 4). Es muy evidente el lajado subhorizontal descompresivo en el frente de talud. Aquí las ignimbritas manifiestan mayor consistencia y calidad de roca (Fig.5)



Figura 4.- Estación Geomecánica MU-02.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**



Figura 5.- Estación Geomecánica MU-02. Aspecto de la roca



Figura 6.- Estación Geomecánica MU-02. Fracturación

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

La estación **MU-03** se localiza sobre el macizo rocoso en el que apoya el muro de presa (Fig.7), configurado por un escarpe de unos 5 metros alto formado por ignimbritas masivas y bandeadas (Fig 8).



Figura 7.- Estación Geomecánica MU-03 sobre el muro de la presa del Mulato



Figura 8.- Estación Geomecánica MU-03. Aspecto de las ignimbritas bandeadas

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

La estación **MU-04** se localiza sobre el macizo rocoso en el que apoya el muro de presa en el lado oriental (Fig.9), formado por las mismas ignimbritas bandeadas que en MU-03.



Figura 9.- Estación Geomecánica MU-04. Detalle del afloramiento



Figura 10.- Estación Geomecánica MU-04. Detalle de la roca y fracturación

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

3. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA.

Común a todas las estaciones geomecánicas estudiadas, y por ende a la totalidad del apoyo del muro de la presa del Mulato, el macizo rocoso está caracterizado por **ignimbritas riolíticas intracaldera** de la **Formación Traquítico-Riolítica del Ciclo I** del vulcanismo del sur de la isla de Gran Canaria (Fig. 10).

Estas ignimbritas forman apilamiento sucesivo en bancos de potencia métrica variable, entre 5 a 15 metros, dando un fuerte relieve escarpado. Son rocas bastante competentes.



Figura 10.- Bancos de ignimbritas soldadas del dominio extracaldera en discordancia angular con las ignimbritas y lavas intracaldera, en el barraco del Mulato-Mogán.

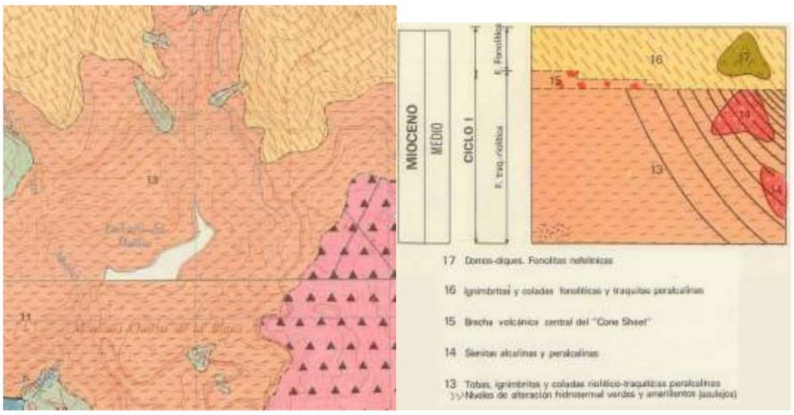


Figura 11.- Mapa Geológico del entorno de la presa del Mulato (Magna 1108-III y 1113-I, IGME 1990)

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

Petrográficamente estas ignimbritas presentan una textura fragmentaria muy fina, con ligeros bandeados ocasionales. Los escasos fragmentos son muy pequeños, generalmente anortoclasa y localmente restos de traquita, pómez y algún cristal de anfíbol. La matriz está formada por cenizas vítreas muy desvitrificadas y minerales opacos oxidados

En las figuras 5 y 8 se representan estas ignimbritas, masivas y con textura bandeada, respectivamente, que se asocian al macizo rocoso en la presa del Mulato.

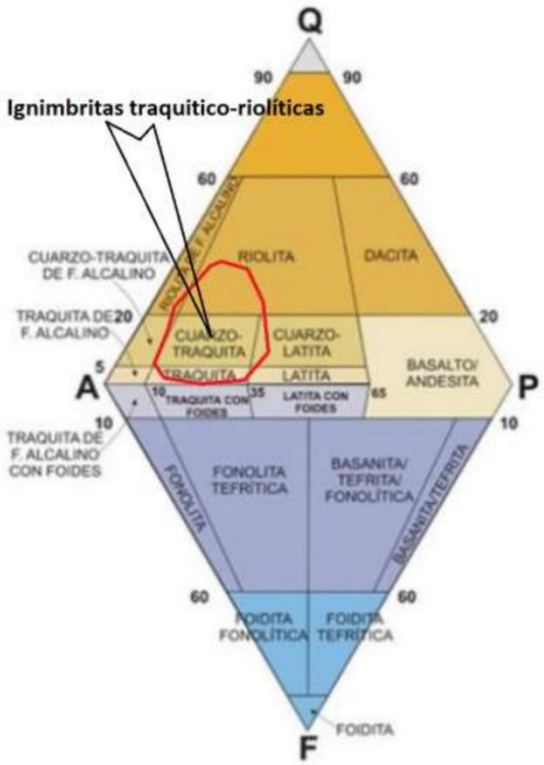


Figura 12.- Ignimbritas traquítico-riolíticas en el Diagrama de Strekeisen

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

4. CARACTERIZACIÓN TECTÓNICO-ESTRUCTURAL.

Como rasgo general de toda la zona, la tectónica es de carácter distensivo y está representada por fallas, sistemas filonianos, estructuras calderiformes y basculamiento de coladas lávicas y piroclásticas.

Dentro de las estaciones geomecánicas analizadas, las estructuras localizadas se corresponden esencialmente a la diaclasas y pequeñas fracturas distensivas, sin movimiento aparente. Por otra parte, cabe mencionar que en algunos puntos las ignimbritas marcan un "setting" relacionado <con la diferenciación en bancos que se traduce en un lajamiento subhorizontal, más o menos marcado, pero que puede actuar como discontinuidad mecánica generalizada a todo el macizo rocoso.

La red de diaclasado en las cuatro estaciones geomecánicas se puede resumir en las siguientes familias predominantes:

Estación Geomecánica	Familia 1	Familia 2
MU-01	N-S/80º	n40ºW/90º
MU-02	N-S/90º	N30ºW/90º
MU-03	N40ºW/90º	N-S / -90º
MU-04	N40ºW/90º	-

El Diagrama en Rosa de la figura siguiente muestra la distribución espacial de las familias de diaclasas observadas en las estaciones geoestadísticas. En conjunto se observan dos superfamilias de fracturas, todas ellas con buzamientos verticales o subverticales, la primera de ellas con marcada orientación N-S y una segunda, de mayor amplitud angular, entre N30ºW a N40ºW.

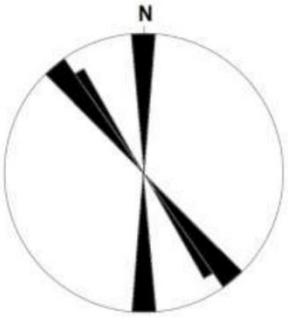


Figura 13.- Diagrama en Rosa de la red de diaclasado en las estaciones geomecánicas tomadas en la presa del Mulato

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

En la figura 14 se ha una representación esquemática de la presencia de las familias de diaclasas en cada una de las estaciones geomecánicas analizadas, observándose en conjunto el predominio de las estructuras N-S en los tres puntos, con la existencia del otro grupo de diaclasas de tendencia NE-SW a E-W.



Figura 14.- Distribución de las trazas de diaclasado en las estaciones geomecánicas

Además de las dos familias de diaclasas definidas anteriormente, hay que considerar los planos de estratificación subhorizontal que delimitan los distintos bancos de ignimbrita. Aunque no tienen la incidencia del diaclasado general, si que pueden afectar a la calidad del macizo rocoso cuando están muy apretados. A escala general de los afloramientos estudiados el lajamiento subhorizontal no es muy marcado.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

5. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA.

5.1.- Toma de datos

Sobre las estaciones geomecánicas se han realizado una toma de datos relacionada, de una parte, con la caracterización litológica del macizo rocoso, y de otra, relacionada con la caracterización estructural-tectónica. La suma de ambas será la responsable de la caracterización geomecánica del punto escogido.

Así, por cada estación geomecánica se han tomado los siguientes tipos de datos:

- Localización geográfica (coordenadas UTM)
- Caracterización Geológica del afloramiento
    - Descripción litológica a escala mesoscópica
    - Clasificación de la roca
- Estructura y calidad de afloramiento
    - Grado de fracturación general
    - Resistencia de la matriz rocosa
    - Grado de Meteorización
    - Influencia del agua
- Caracterización de las discontinuidades
    - Naturaleza
    - Orientación (Azimut y buzamiento)
    - Espaciamientos entre discontinuidades
    - Rugosidad
    - Apertura
    - Rellenos
    - Flujo de agua
    - Alteración general
- Mediciones sistemáticas con Martillo de Schmidt-Esclerómetro

Todos los datos obtenidos han sido reflejados en la ficha de caracterización geomecánica que se anexa a este informe.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

5.2- Cálculo de índices geomecánicos.

A partir de los datos obtenidos en el trabajo de campo se ha procedido al cálculo del **RMR** (*Rock Mass Rating*).

El **RMR** (Bieniaswki Z.T. 1989) constituye un sistema de clasificación de los macizos rocosos que permite a su vez relacionar índices de calidad con parámetros geotécnicos del macizo, aplicado esencialmente para túneles, taludes y cimentaciones. Esta clasificación tiene en cuenta los siguientes parámetros geomecánicos:

- Resistencia uniaxial de la matriz rocosa
- Grado de fracturación en términos del RQD
- Espaciado de discontinuidades
- Condiciones de las discontinuidades (rugosidad, apertura, relleno, meteorización de los bordes)
- Condiciones hidrogeológicas (flujo de agua)

Estos parámetros se han determinado a partir de la valoración de los datos de campo obtenidos. De esta forma:

a) Cálculo de la Resistencia a partir del martillo Schmidt.

La Resistencia Uniaxial de la matriz rocosa viene determinada por el cálculo del valor Q de las mediciones con **Esclerómetro** o **Martillo Schmidt** realizadas en cada estación. A partir de los datos de rebote obtenidos sobre la matriz rocosa, y teniendo en cuenta el peso específico de la roca, se obtiene la resistencia a la compresión simple de la roca, parámetro necesario para aplicarlo en la clasificación geomecánica del RMR.

La litología definida en las 3 estaciones geomecánicas de la presa del Mulato se corresponde con **ignimbritas riolíticas soldadas**, cuyo **peso específico es de 25,2 kN/m^3** (Hernández-Gutiérrez L.E. 2014).

La tabla siguiente muestra los valores Q obtenidos con el esclerómetro para cada una de las estaciones:

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

MU-01			MU-02			MU-03		
Valor Q	*Valores seleccionados*	*Promedio Valores Seleccionados*	*Valor Q*	*Valores seleccionados*	*Promedio Valores Seleccionados*	*Valor Q*	*Valores seleccionados*	*Promedio Valores Seleccionados*
26			62	62		66	66	
44			64	64		68	68	
50	50		58	58		70	70	
38			50			60		
52	52	***50,8***	55		***61,2***	58		***66,4***
58	58		50			56		
24			52			62	62	
50	50		48			62		
44	44		62	62		58		
42			60	60		66	66	

MU-04		
Valor Q	*Valores seleccionados*	*Promedio Valores Seleccionados*
50		
60		
62	62	
68	68	
60		***62,8***
52		
62	62	
54		
60	60	
62	62	

Hay que indicar que en todos los casos las mediciones con Martillo Schmidt se realizaron perpendicularmente sobre planos verticales del afloramiento.

Aplicando el valor Q y el peso específico en el diagrama de la figura 16, considerando el ángulo del plano sobre el que se ha medido, se obtienen los siguientes valores de ***Resistencia Uniaxial a la Compresión σ_c (MPa)***

Estación	Litología	Peso Específico real (kN/m3)	Valor Q promedio	Resistencia Uniaxial a la Compresión (MPa)
MU-01	**Ignimbrita soldada**	**25,2**	**50,8**	***145***
MU-02	**Ignimbrita soldada**	**25,2**	**61,2**	***220***
MU-03	**Ignimbrita soldada**	**25,2**	**66,4**	***240***
MU-04	**Ignimbrita soldada**	**25,2**	**62,8**	***230***

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

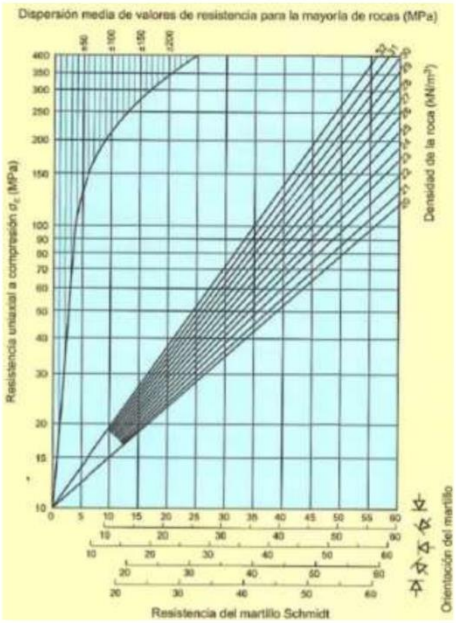


Figura 15.- Diagrama de Resistencia a la Compresión Uniaxial en mediciones con Martillo Schmidt

b) Grado de fracturación en términos de RQD.

Se hizo una estimación del RQD del macizo a partir del análisis in situ de transversales a las fracturas preferentes. En los cuatros casos analizados, los ángulos de estas estructuras son cercanos a la vertical, por lo que la línea de estudio fue horizontal, estando condicionado el resultado directamente del espaciado real entre las fracturas, en todos los casos, diaclasas.

De esta forma, se determinaron los siguientes valores de RQD:

Estación	RQD (%)
MU-01	60
MU-02	75
MU-03	80
MU-04	70

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

c) Espaciado de las discontinuidades.

De las medidas de fracturas observadas se determinó el espaciado medio:

Estación	Espaciado entre discontinuidades (m)
MU-01	0,30
MU-02	0,30
MU-03	0,50
MU-04	0,45

d) Condicionado de las discontinuidades.

En la tabla siguiente se resumen las condiciones específicas de las discontinuidades:

Estación	Rugosidad	Apertura (mm)	Relleno	Meteorización de los bordes
MU-01	Media-Alta	*1 - 2*	*No se observa*	*Media*
MU-02	Media-Alta	*1 -2*	*No se observa*	*Baja*
MU-03	Media-Alta	*1 - 2*	*No se observa*	*Baja*
MU-04	Media-Alta	*1 - 2*	*No se observa*	*Media*

e) Condiciones hidrogeológicas

En la tabla siguiente se resumen las condiciones específicas relacionadas con el flujo de agua:

Estación	Flujo de agua
MU-01	*No se observa*
MU-02	*No se observa*
MU-03	*No se observa*
MU-04	*No se observa*

5.3.- Determinación de la Clasificación del macizo rocoso por el RMR.

El cálculo del índice da un porcentaje variable a cada uno de estos parámetros, desde 0 a 100. La tabla de la página siguiente especifica los campos de favorabilidad de cada uno de los parámetros especificados:

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

RMR CLASIFICATION

CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS (BIENIAWSKI 1989)									
1	Resistencia de la matriz rocosa	Ensayo de Carga Puntua	>10MPa	4 - 10MPa	2 - 4MPa	1 - 2MPa	Compresión simple (MPa) (para bajos rangos)		
		Compresión Simple	R6 >250MPa	R5 100 - 250MPa	R4 50 - 100MPa	R3 25 - 50MPa	R2 10-25	R1 3-10	R0 1-3
	Valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
	Valoración		20	17	13	8	3		
3	Espaciado de discontinuidades		>2m	0.6 - 2m	200 - 600mm	60 - 200mm	<60mm		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Condiciones de las discontinuidades		Muy rugosas Discontinuas Sin apertura Sin alteración	Algo rugosas Apertura < 1mm Algo alteradas	Algo rugosas Apertura < 1mm Muy alteradas	Superficie deslizante y Apertura<5mm o Apertura de 1-5mm continua	Relleno escaso >5mm anchura or Apertura >5mm Continua		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua Freática	Caudal por 10m de tunel (l/m)	Nulo	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Presión de agua/ Tensión princ. mayor	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		Estado general	Seco	Ligeramente humedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
	Valoración		15	10	7	4	0		

Según la ponderación marcada en la *Clasificación de Bieniaswki*, los distintos parámetros para cada estación geomecánica son los siguientes:

Estación	*Resistencia Uniaxial a la Compresión*	*Grado de Fracturación (RQD)*	*Espaciado de discontinuidades*	*Condicionado de discontinuidades*	*Condiciones hidrogeológicas*	*VALORACIÓN TOTAL*
MU-01	*12*	*13*	*10*	*25*	*15*	*75*
MU-02	*12*	*17*	*10*	*25*	*15*	*79*
MU-03	*12*	*17*	*10*	*25*	*15*	*79*
MU-04	*12*	*17*	*10*	*25*	*15*	*79*

Según estos resultados, la ***Calidad del macizo rocoso en relación al índice RMR*** de Bieniaswki en las cuatro estaciones geomecánicas analizadas de la Presa del MULATO, se encuadraría en la **Clase II – Calidad Buena**, con valores comprendidos entre 80 y y 61.

Clase	Calidad	Valoración RMR	Estación Geomecánica.
I	Muy Buena	100 - 81	
II	**Buena**	**80 - 61**	**MU-01 / MU-02 /MU-03/MU-04**
III	Media	60 - 41	
IV	Mala	40 - 21	
V	Muy mala	<20	

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- IGME (1990).- Mapa Geológico a escala 1:25.000, Hojas nº 1108-III "San Nicolás de Tolentino". Serie Magna. Publicación del Instituto Geológico y Minero de España. 1990

- IGME (1990).- Mapa Geológico a escala 1:25.000, Hojas nº 1113-I "Mogán". Serie Magna. Publicación del Instituto Geológico y Minero de España. 1990

- Bieniaswki, Z.T. (1989).- "Engineering Rock Mass Classifications". Ed. Wiley, New York, 252 pp.

- Romana, M. (2003).- "DMR, a new geomechanics classification for use in dams foundations, adapted from RMR". 4th International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams. Madrid

- Henríquez-Gutiérrez, L.E. (2014).- "Geomechanical characterization of volcanic rocks of the Canary Islands". Tesis Doctoral. Universidad de La Laguna.

Agüimes, febrero 2021.

Ismael Solaz Alpera
Geólogo

Néstor Abián Rodríguez Santana
Geólogo

Francisco Hernández Naranjo
Vº.Bº. Director de Laboratorio

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A



A N E X O S
Fichas de campo de las Estaciones Geomecánicas

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

ANEXO I
Estación Geomecánica MU-01

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador	Hoja 1
PRESA DEL MULATO / MU-01			13/01/2021	I.Solaz	
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R	
	Coordenadas	X= 431347	Y= 3088306	Z= 753 m	

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	
UNIDAD GEÓLOGICA	Formación Traquítico-riolítica del Ciclo I (Dominio intracaldera)
LITOLOGÍA	Ignimbritas masivas
Descripción	Roca competente gris oscura, matriz fina, con fenocristales de feldespato alargados (1-3 mm). Alteración superficial marcada

ESTRUCTURA Y CALIDAD DE AFLORAMIENTO					
Grado de Fracturacion general		Bloques	Jv JuntaS/m3		
Muy Grandes	Grandes	Medios	Pequeños	Muy Pequeños	Muy Brechificado
<1	1-3	3-10	10-30	>30	>60

Resistencia Martiz rocosa						
Extremada blanda	Muy blanda	Blanda	Media	Dura	Muy Dura	Extrem. muy Dura
R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6

Grado de Meteorización					
Sana	Algo Meteo	Media Meteo	Muy meteo	ompletam. Mete	Suelo Resid

Hidrogeologia					
Sin Agua	Seco con señales	Húmedo	Goteos	Flujo	Caudal Estim

CROQUIS



Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador
PRESA DEL MULATO / MU-01			13/01/2021	I.Solaz
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R
	Coordenadas	X= 431347	Y= 3088306	Z=753 m

Hoja 2

CARACTERIZACION DE LAS DISCONTINUIDADES

		FAMILIA 1	FAMILIA 2	FAMILIA 3	FAMILIA 4	FAMILIA 5
Strike	Tipología	Diaclasa	Diaclasa			
	Azimut	N-S	N40ºW			
	Buzamiento	80ºN	subvertical			
Persistencia		< 3 m	< 1 m			
Espaciam	Rango	15 - 40 cm	20 - 40 cm			
	Medio	20 cm	30 cm			
Rugosidad Gral.		Alta	Media-Alta			
Apertura	Rango	1 mm	1-2 mm			
	Medio	1 mm	1 mm			
Relleno	Si / No	No	No			
	Tipo					
Flujo	C. Gral.	No	No			
Alteracion Gral.		Bajo-medio	Medio			

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

Caracterización de Estaciones Geomecánicas. Presa del Mulato.
Mogán - Gran Canaria.
Febrero 2021.

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador
PRESA DEL MULATO / MU-01			13/01/2021	I.Solaz
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R
	Coordenadas	X= 431347	Y= 3088306	Z= 753 m

Hoja 3

Mediciones Martillo Schmith			
	Valor Q	Seleccionados	Promedio
DATO 1	26		50,8
DATO 2	44		
DATO 3	50	50	
DATO 4	38		
DATO 5	52	52	
DATO 6	58	58	
DATO 7	24		
DATO 8	50	50	
DATO 9	44	44	
DATO 10	42		

Orientación Plano		
	Azimut	N40ºW / 90º
	Buzamiento	90º

Observaciones
Resistencia a la Compresión Simple calculada con un peso especifico para las ignimbriras soldadas de 25,2 kN/m3, calculado con Diagrama de Resistencia de Martillo Schmidt es de unos 140 Mpa

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ANEXO II
Estación Geomecánica MU-02

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador	Hoja 1
PRESA DEL MULATO / MU-02			13/01/2021	I.Solaz	
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R	
	Coordenadas	X= 431354	Y= 3088322	Z= 745 m	

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	
UNIDAD GEÓLOGICA	Formación Traquítico-riolítica del Ciclo I (Dominio intracaldera)
LITOLOGÍA	Ignimbritas masivas
Descripción	Roca competente gris oscura, matriz fina, con fenocristales de feldespato alargados (1-3 mm).

ESTRUCTURA Y CALIDAD DE AFLORAMIENTO					
Grado de Fracturacion general		Bloques	Jv JuntaS/m3		
Muy Grandes	Grandes	Medios	Pequeños	Muy Pequeños	Muy Brechificado
<1	1-3	3-10	10-30	>30	>60

Resistencia Martiz rocosa						
Extremada blanda	Muy blanda	Blanda	Media	Dura	Muy Dura	Extrem. muy Dura
R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6

Grado de Meteorización					
Sana	Algo Meteo	Media Meteo	Muy meteo	ompletam. Mete	Suelo Resid

Hidrogeología					
Sin Agua	Seco con señales	Húmedo	Goteos	Flujo	Caudal Estim

CROQUIS



Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador	Hoja 3
PRESA DEL MULATO / MU-02			13/01/2021	I.Solaz	
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R	
	Coordenadas	X= 431354	Y= 3088322	Z= 745 m	

Mediciones Martillo Schmith			
	Valor Q	Seleccionados	Promedio
DATO 1	62		61,2
DATO 2	64		
DATO 3	58		
DATO 4	50		
DATO 5	55		
DATO 6	50		
DATO 7	52		
DATO 8	48		
DATO 9	62		
DATO 10	60		

Orientación Plano		
	Azimut	N60ºW
	Buzamiento	90º

Observaciones
Resistencia a la Compresión Simple calculada con un peso especifico para las ignimbriras soldadas de 25,2 kN/m3, calculado con Diagrama de Resistencia de Martillo Schmidt es de unos 205 Mpa

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A



ANEXO III
Estación Geomecánica MU-03

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

Caracterización de Estaciones Geomecánicas. Presa del Mulato.
Mogán - Gran Canaria.
Febrero 2021.

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador	Hoja 1
PRESA DEL MULATO / MU-03			13/01/2021	I.Solaz	
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R	
	Coordenadas	X= 431357	Y= 3088351	Z= 727 m	

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	
UNIDAD GEÓLOGICA	Formación Traquitico-riolitica del Ciclo I (Dominio intracaldera)
LITOLOGÍA	Ignimbritas masivas
Descripción	Roca competente gris oscura, matriz fina, con fenocristales de feldespato alargados (1-3 mm).

ESTRUCTURA Y CALIDAD DE AFLORAMIENTO					
Grado de Fracturacion general		Bloques	Jv JuntaS/m3		
Muy Grandes	Grandes	Medios	Pequeños	Muy Pequeños	Muy Brechificado
<1	1-3	3-10	10-30	>30	>60

Resistencia Martiz rocosa						
Extremada blanda	Muy blanda	Blanda	Media	Dura	Muy Dura	Extrem. muy Dura
R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6

Grado de Meteorización					
Sana	Algo Meteo	Media Meteo	Muy meteo	ompletam. Mete	Suelo Resid

Hidrogeología					
Sin Agua	Seco con señales	Húmedo	Goteos	Flujo	Caudal Estim

CROQUIS



Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador
PRESA DEL MULATO / MU-03			13/01/2021	I.Solaz
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R
	Coordenadas	X= 431357	Y= 3088351	Z=727 m

Hoja 2

CARACTERIZACION DE LAS DISCONTINUIDADES

		FAMILIA 1	FAMILIA 2	FAMILIA 3	FAMILIA 4	FAMILIA 5
Strike	Tipología	Diaclasa	Diaclasa			
	Azimut	N40ºW	N-S			
	Buzamiento	90º	90º			
Persistencia		> 1 m	> 1 m			
Espaciam	Rango	40 - 250 cm	10 - 250 cm			
	Medio	50 cm	30 cm			
Rugosidad Gral.		Media-Alta	Media-Alta			
Apertura	Rango	1-2 mm	1-2 mm			
	Medio	1 mm	1 mm			
Relleno	Si / No	No	No			
	Tipo					
Flujo	C. Gral.	No	No			
Alteracion Gral.		Media	Media			

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador
PRESA DEL MULATO / MU-03			13/01/2021	I.Solaz

Hoja 3

Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R
	Coordenadas	X= 431357	Y= 3088351	Z= 727 m

Mediciones Martillo Schmith

	Valor Q	Seleccionados	Promedio
DATO 1	66	66	66,4
DATO 2	68	68	
DATO 3	70	70	
DATO 4	60		
DATO 5	58		
DATO 6	56		
DATO 7	62	62	
DATO 8	62		
DATO 9	58		
DATO 10	66	66	

Orientación Plano

Azimut	E-W
Buzamiento	90º

Observaciones

Resistencia a la Compresión Simple calculada con un peso especifico para las ignimbriras soldadas de 25,2 kN/m3, calculado con Diagrama de Resistencia de Martillo Schmidt es de unos 210 Mpa

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ANEXO IV
Estación Geomecánica MU-04

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

Caracterización de Estaciones Geomecánicas. Presa del Mulato.
Mogán - Gran Canaria.
Febrero 2021.

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador	Hoja 1
PRESA DEL MULATO / MU-04			13/01/2021	I.Solaz	
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R	
	Coordenadas	X= 431367	Y= 3088403	Z= 734 m	

CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	
UNIDAD GEÓLOGICA	Formación Traquitico-riolitica del Ciclo I (Dominio intracaldera)
LITOLOGÍA	Ignimbritas masivas
Descripción	Roca competente gris oscura, matriz fina, con fenocristales de feldespato alargados (1-3 mm).

ESTRUCTURA Y CALIDAD DE AFLORAMIENTO					
Grado de Fracturacion general		Bloques	Jv JuntaS/m3		
Muy Grandes	Grandes	Medios	Pequeños	Muy Pequeños	Muy Brechificado
<1	1-3	3-10	10-30	>30	>60

Resistencia Martiz rocosa						
Extremada blanda	Muy blanda	Blanda	Media	Dura	Muy Dura	Extrem. muy Dura
R0	R1	R2	R3	R4	R5	R6

Grado de Meteorización					
Sana	Algo Meteo	Media Meteo	Muy meteo	ompletam. Mete	Suelo Resid

Hidrogeología					
Sin Agua	Seco con señales	Húmedo	Goteos	Flujo	Caudal Estim

CROQUIS



Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador
PRESA DEL MULATO / MU-04			13/01/2021	I.Solaz
Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R
	Coordenadas	X= 431367	Y= 3088403	Z= 734 m

Hoja 2

CARACTERIZACION DE LAS DISCONTINUIDADES

		FAMILIA 1	FAMILIA 2	FAMILIA 3	FAMILIA 4	FAMILIA 5
Strike	Tipología	Diaclasa				
	Azimut	N40ºW				
	Buzamiento	N85ºS-90º				
Persistencia		> 5 m				
Espaciami	Rango	40 - 50 cm				
	Medio	45 cm				
Rugosidad Gral.		Media				
Apertura	Rango	1-2 mm				
	Medio	1 mm				
Relleno	Si / No	No				
	Tipo					
Flujo	C. Gral.	No				
Alteracion Gral.		Media				

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de **LABETEC, S.A**

ESTACIÓN GEOMECÁNICA			Fecha	Operador
PRESA DEL MULATO / MU-04			13/01/2021	I.Solaz

Hoja 3

Localizacion UTM	Datum	WGS 84	Huso	28R
	Coordenadas	X= 431367	Y= 3088403	Z= 734 m

Mediciones Martillo Schmith

	Valor Q	Seleccionados	Promedio
DATO 1	50		62,8
DATO 2	60		
DATO 3	62	62	
DATO 4	68	68	
DATO 5	60		
DATO 6	52		
DATO 7	62	62	
DATO 8	54		
DATO 9	60	60	
DATO 10	62	62	

Orientación Plano	
Azimut	E-W
Buzamiento	90º

Observaciones

Resistencia a la Compresión Simple calculada con un peso especifico para las ignimbriras soldadas de 25,2 kN/m3, calculado con Diagrama de Resistencia de Martillo Schmidt es de unos 245 Mpa

Queda prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin el consentimiento por escrito de LABETEC, S.A

Anejo 2.
RESUMEN DE SONDEO Y ENSAYOS DE REFERENCIA

A1. Determinación de la Densidad y Resistencia a Compresión Simple 115

A2. Determinación de la Resistencia a Tracción Uniaxial 115

A3. Determinación del Módulo de Elasticidad y coeficiente de Poisson 116

A1. Determinación de la Densidad y Resistencia a Compresión Simple

Probeta	Profundidad	Densidad (kg/m^3)	Resistencia Compresión (MPa)
S021-044	3.9	2230	35.20
S021-045	13.0	2100	10.40
S021-046	16.2	1940	9.50
S021-047	21.1	2190	21.70
S021-048	24.2	2540	60.20
S1 - 5.55			32.16
S1 - 13.60			7.02
S1 - 16.40			6.43
S1 - 21.80			19.37
S1 - 25.10			73.75
	Media	2200.0	27.6
	Desvest	220.3	23.3

A2. Determinación de la Resistencia a Tracción Uniaxial

Probeta	Profundidad	R Tracción (MPa)
S021-054	6.25	5.83
S021-054	6.30	5.46
S021-054	6.35	5.45
S021-054	6.40	5.07
S021-055	13.35	4.04
S021-055	13.40	4.05
S021-055	13.45	3.90
S021-055	13.50	4.69
S021-056	16.55	2.87
S021-056	16.60	2.83
S021-056	16.65	2.73
S021-056	16.70	2.83
S021-057	21.85	10.00
S021-057	21.90	10.21
S021-057	21.95	10.22
S021-057	22.00	13.56
S021-058	24.50	22.92
S021-058	24.55	20.45
S021-058	24.60	23.33
S021-058	24.65	23.00
	Media	9.2
	Desvest	7.4

A3. Determinación del Módulo de Elasticidad y coeficiente de Poisson

Probeta	E (MPa)	Coef. Poisson	Probeta	E (MPa)	Coef. Poisson
S1 - 5.55	37176	0.16	**S1 - 16.40**	5251	0.42
S1 - 5.55	31273	0.17	**S1 - 16.40**	5149	0.43
S1 - 5.55	27115	0.19	**S1 - 16.40**	4644	0.44
S1 - 5.55	22435	0.19	**S1 - 16.40**	4535	0.48
S1 - 5.55	18246	0.19	**S1 - 16.40**	4237	0.51
S1 - 5.55	17811	0.21	**S1 - 21.80**	8822	0.18
S1 - 5.55	16837	0.22	**S1 - 21.80**	11384	0.17
S1 - 5.55	16620	0.23	**S1 - 21.80**	13114	0.18
S1 - 5.55	15960	0.25	**S1 - 21.80**	15239	0.18
S1 - 5.55	15259	0.25	**S1 - 21.80**	16246	0.20
S1 - 5.55	15244	0.26	**S1 - 21.80**	16934	0.21
S1 - 13.60	22897	0.30	**S1 - 21.80**	18576	0.24
S1 - 13.60	13765	0.31	**S1 - 21.80**	18030	0.25
S1 - 13.60	10306	0.32	**S1 - 21.80**	18112	0.26
S1 - 13.60	7913	0.33	**S1 - 21.80**	18694	0.28
S1 - 13.60	6484	0.35	**S1 - 21.80**	19187	0.30
S1 - 13.60	5227	0.36	**S1 - 25.10**	14971	0.15
S1 - 13.60	5029	0.38	**S1 - 25.10**	20644	0.17
S1 - 13.60	5009	0.40	**S1 - 25.10**	23601	0.18
S1 - 13.60	4578	0.42	**S1 - 25.10**	25151	0.19
S1 - 13.60	4498	0.45	**S1 - 25.10**	25911	0.20
S1 - 13.60	4571	0.48	**S1 - 25.10**	27002	0.21
S1 - 16.40	22502	0.28	**S1 - 25.10**	27202	0.21
S1 - 16.40	14174	0.30	**S1 - 25.10**	26715	0.21
S1 - 16.40	11313	0.30	**S1 - 25.10**	26675	0.22
S1 - 16.40	9426	0.35	**S1 - 25.10**	27788	0.22
S1 - 16.40	7441	0.37	**S1 - 25.10**	28042	0.23
S1 - 16.40	5479	0.34			
			Media	15753.5	0.28
			Desvest	8508.3	0.10

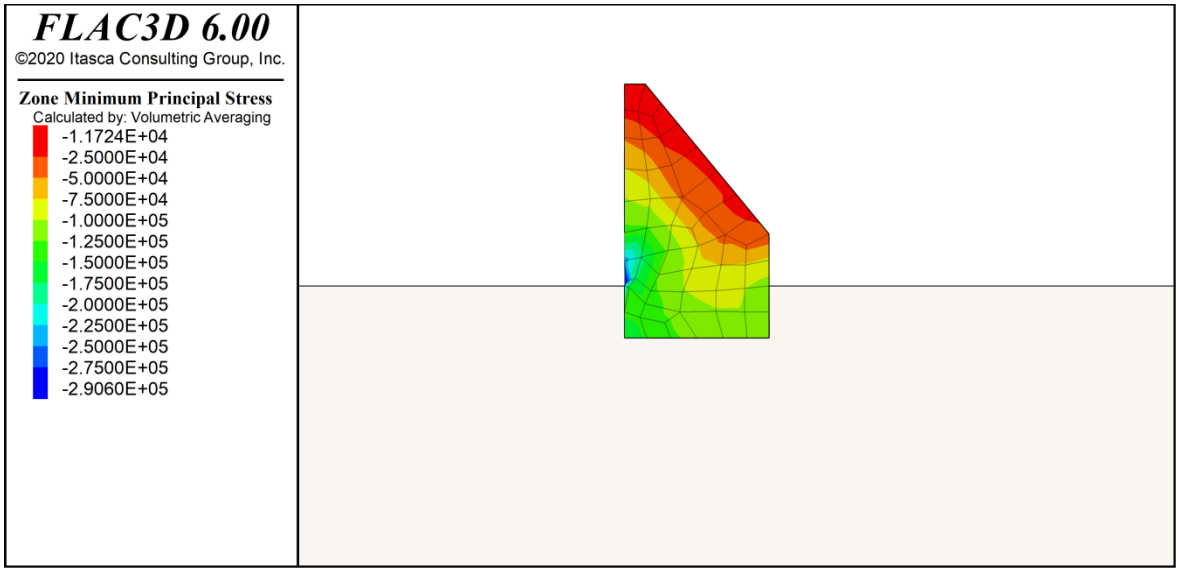
Anejo 3.
RESULTADOS

EMBALSE VACÍO – M2D-E

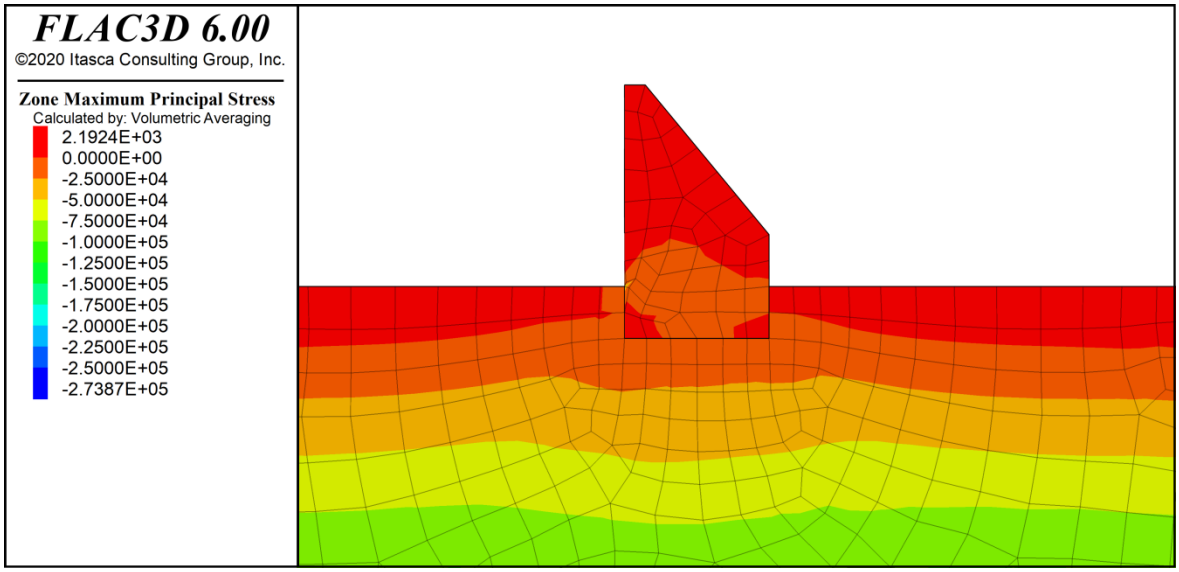
Máxima tracción cuerpo de presa



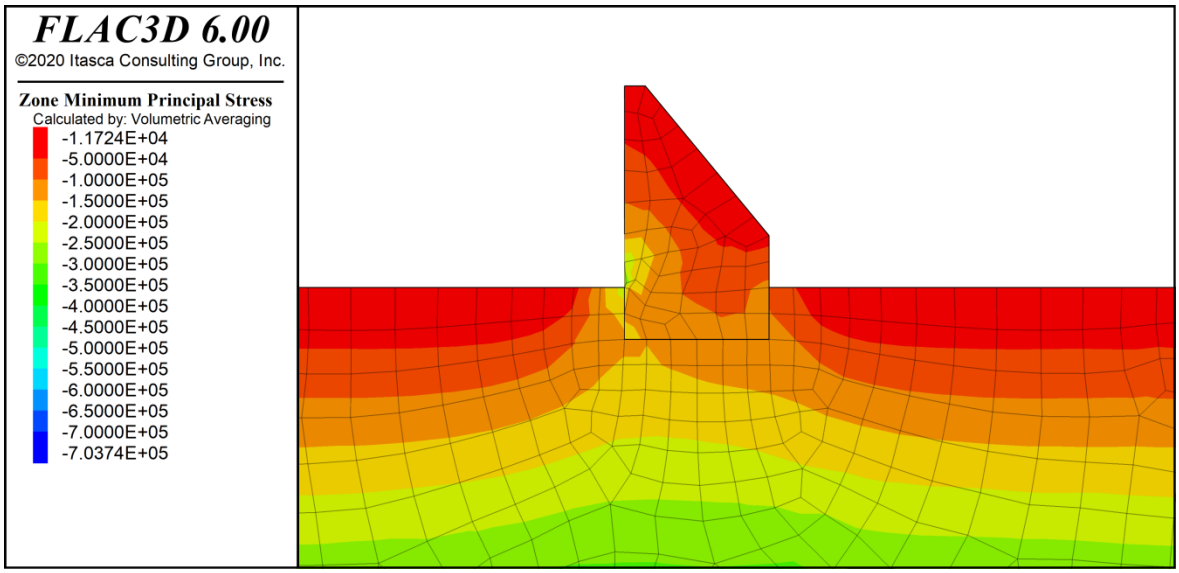
Máxima compresión cuerpo de presa



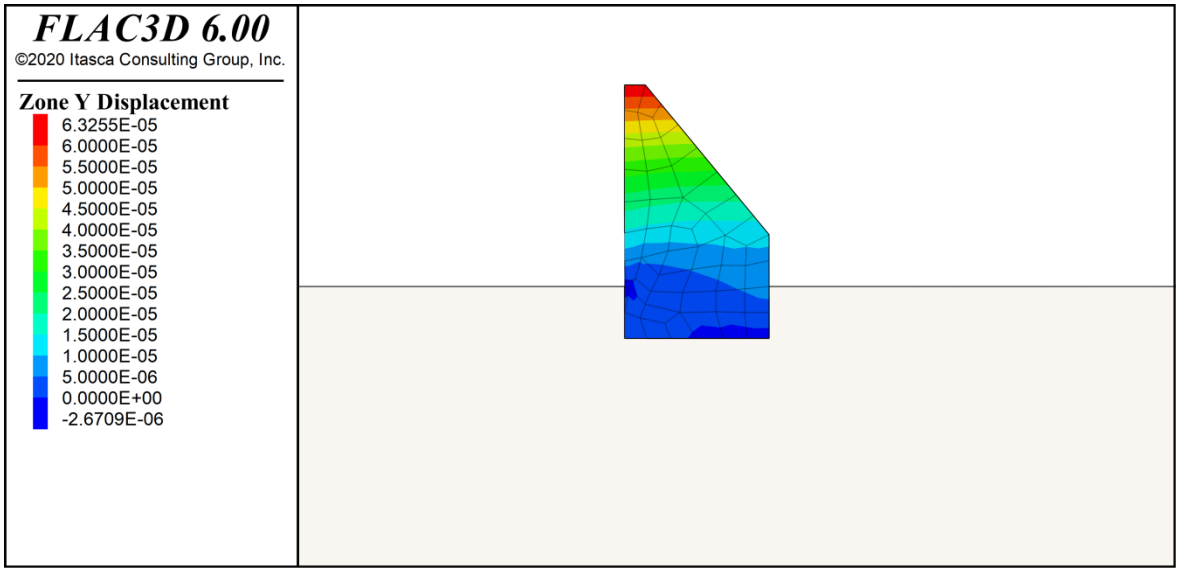
Máxima tracción en cimentación



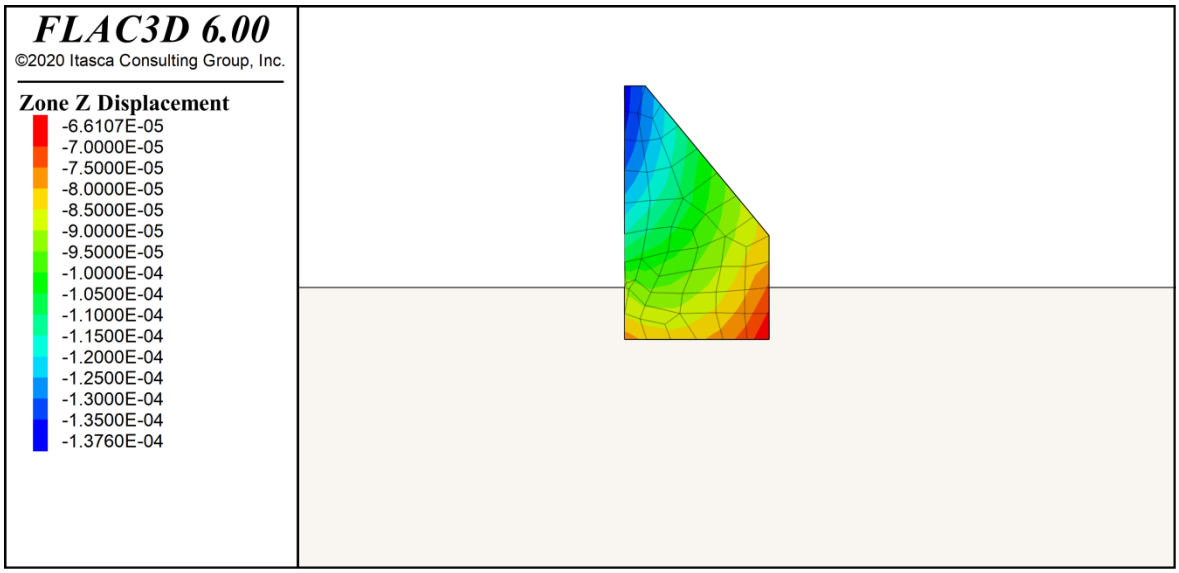
Máxima compresión en cimentación



Máximo desplazamiento horizontal en coronación

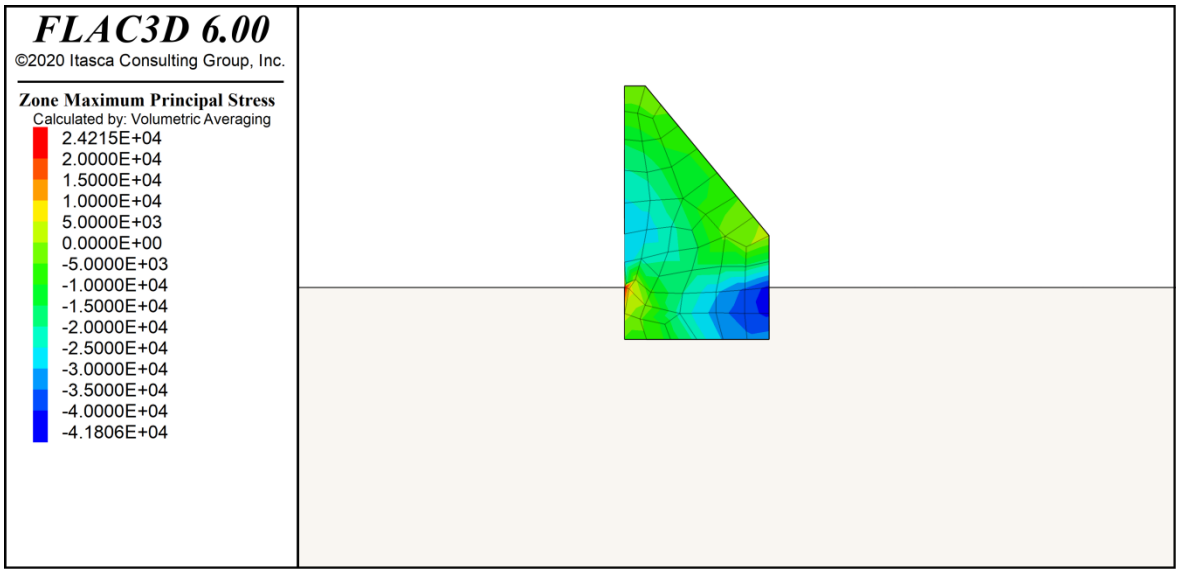


Máximo desplazamiento vertical en coronación

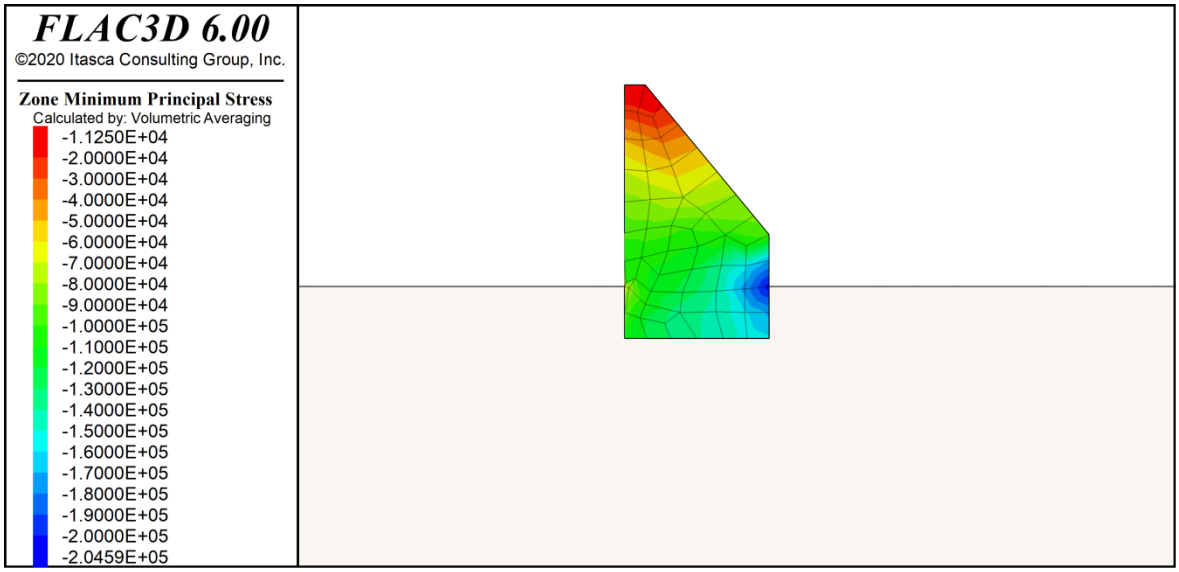


EMBALSE A COTA DE CORNACIÓN – M2D-E

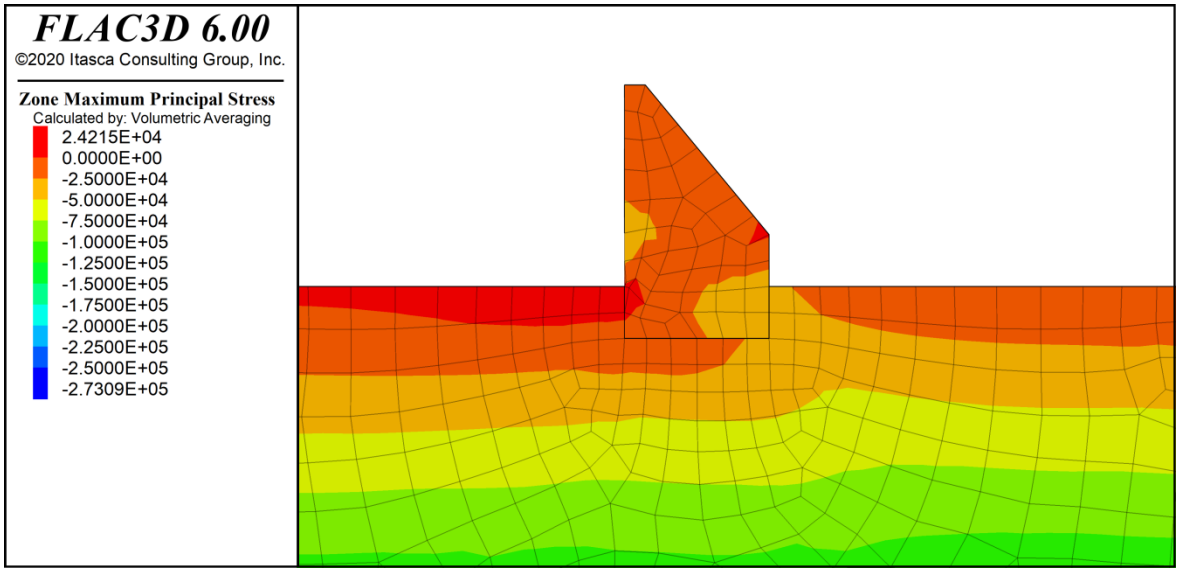
Máxima tracción cuerpo de presa



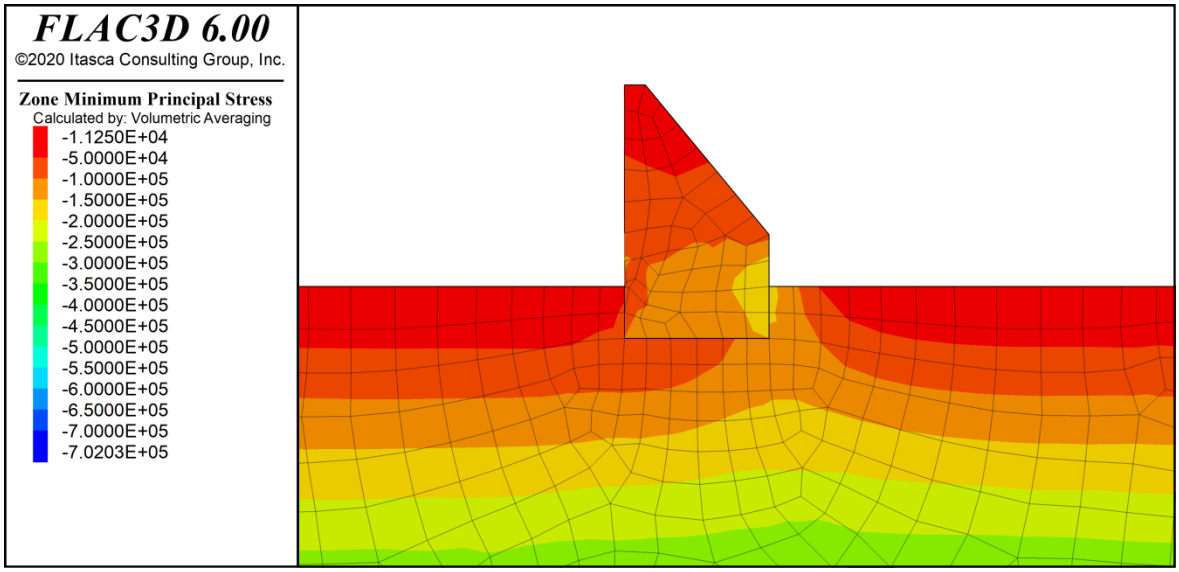
Máxima compresión cuerpo de presa



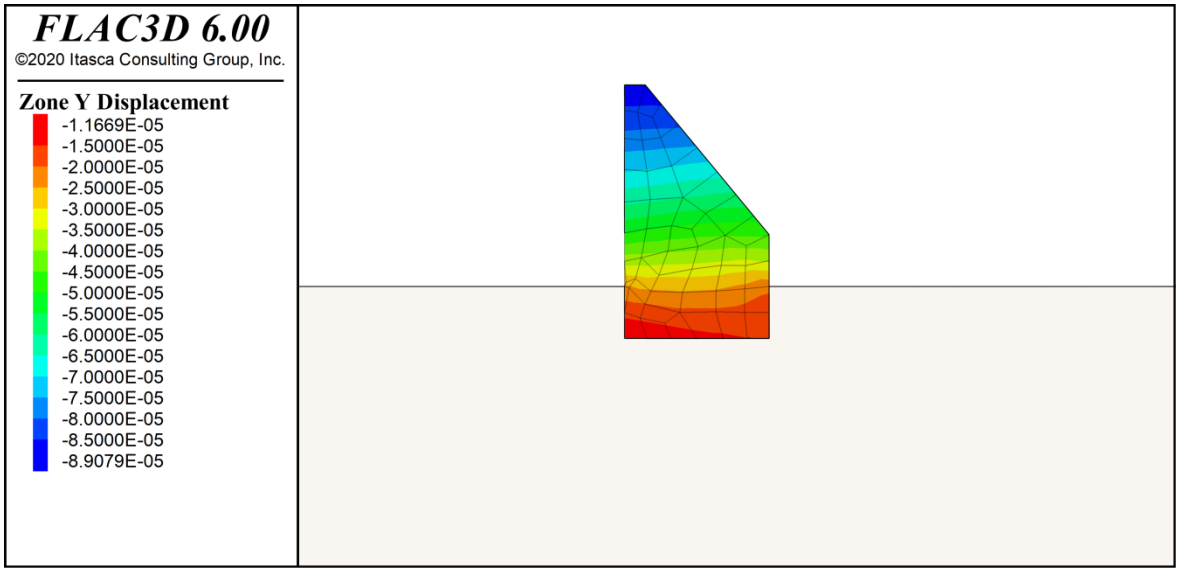
Máxima tracción en cimentación



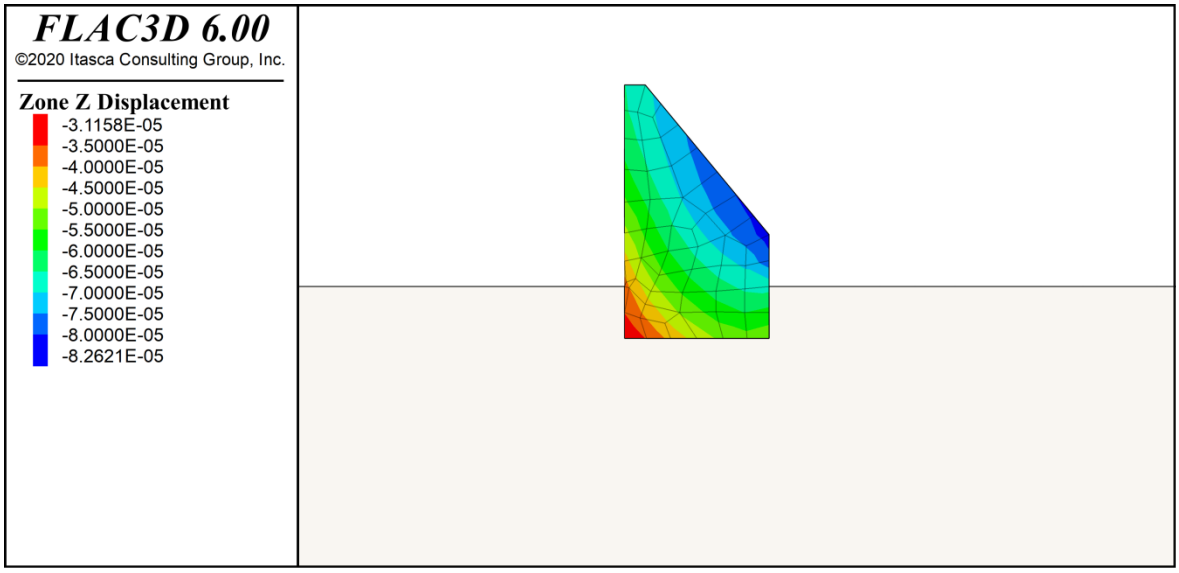
Máxima compresión en cimentación



Máximo desplazamiento horizontal en coronación

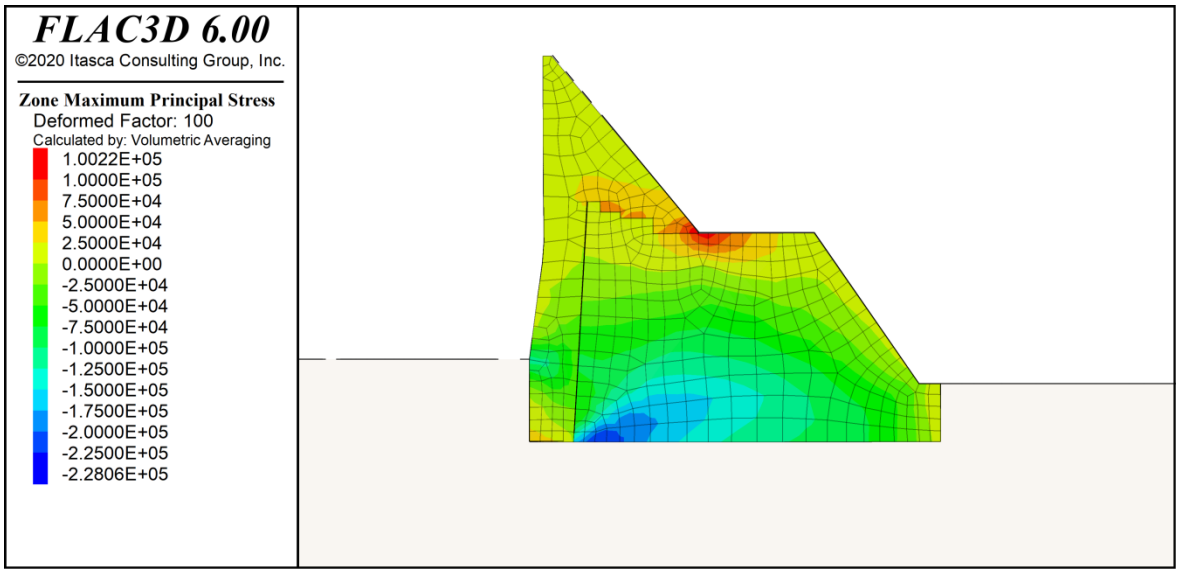


Máximo desplazamiento vertical en coronación

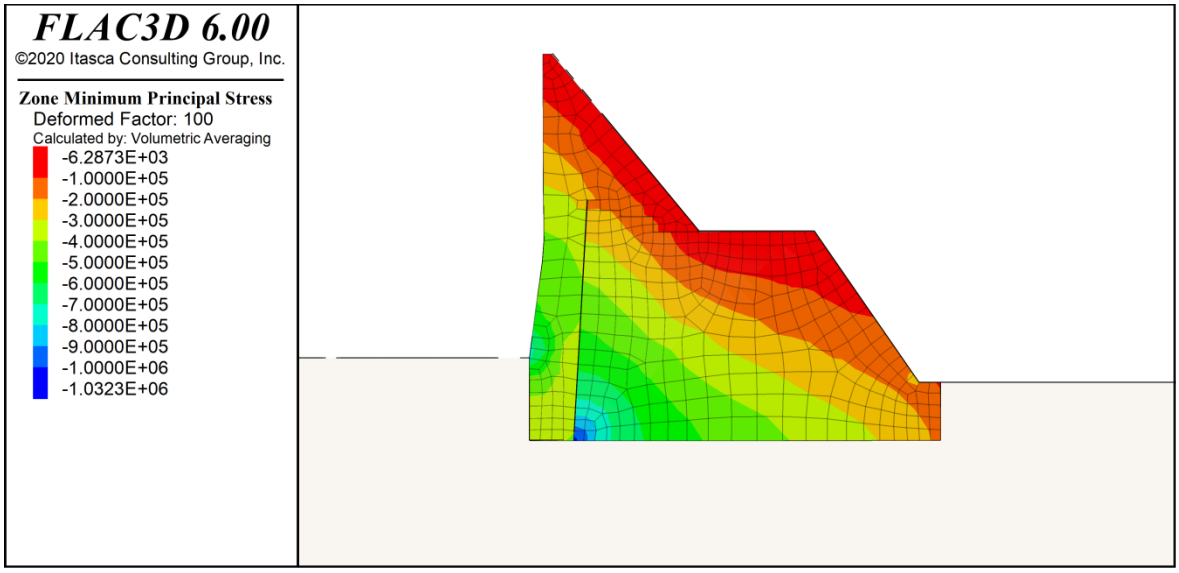


EMBALSE VACÍO – M2D-C

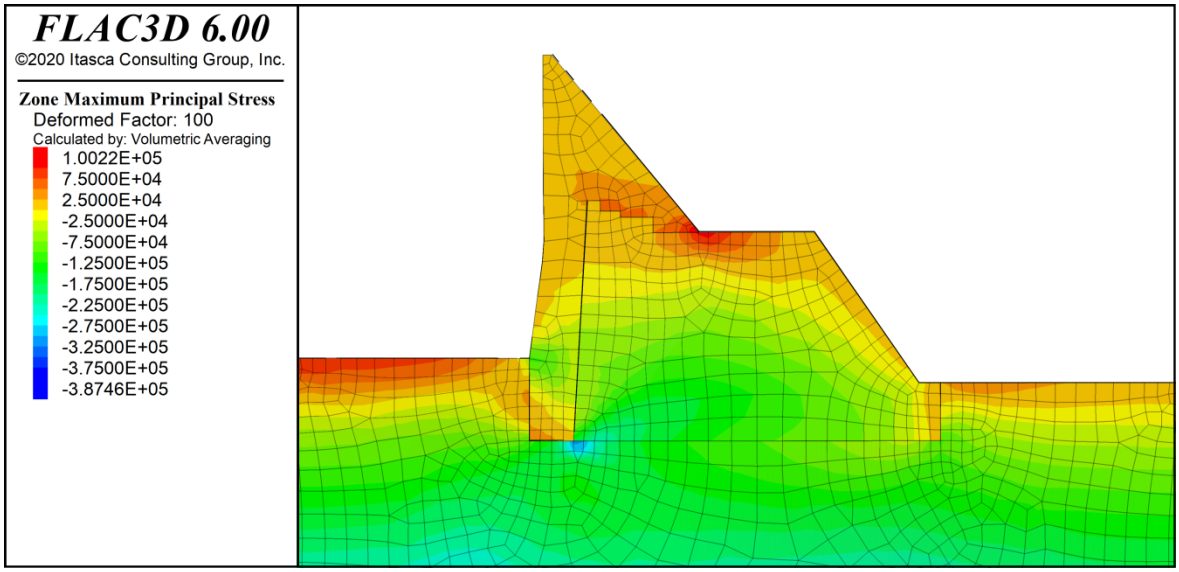
Máxima tracción cuerpo de presa



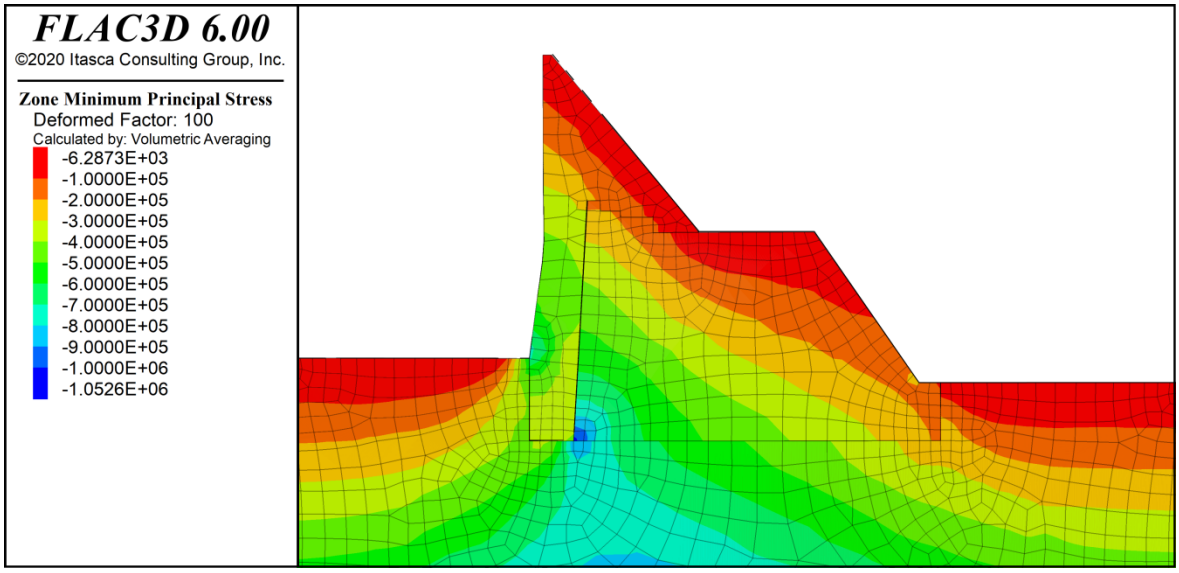
Máxima compresión cuerpo de presa



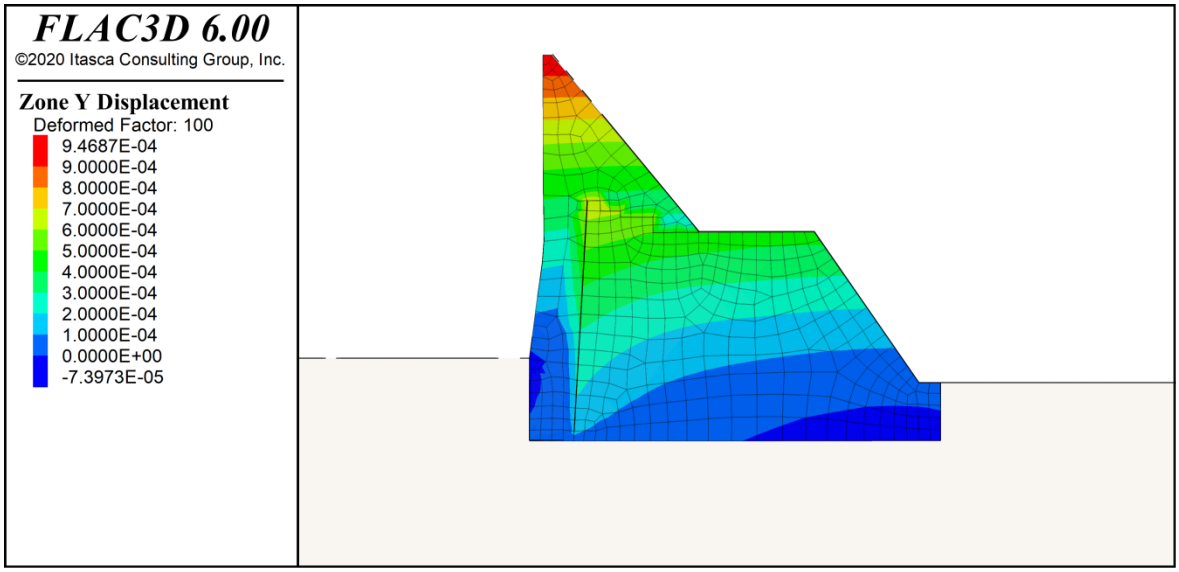
Máxima tracción en cimentación



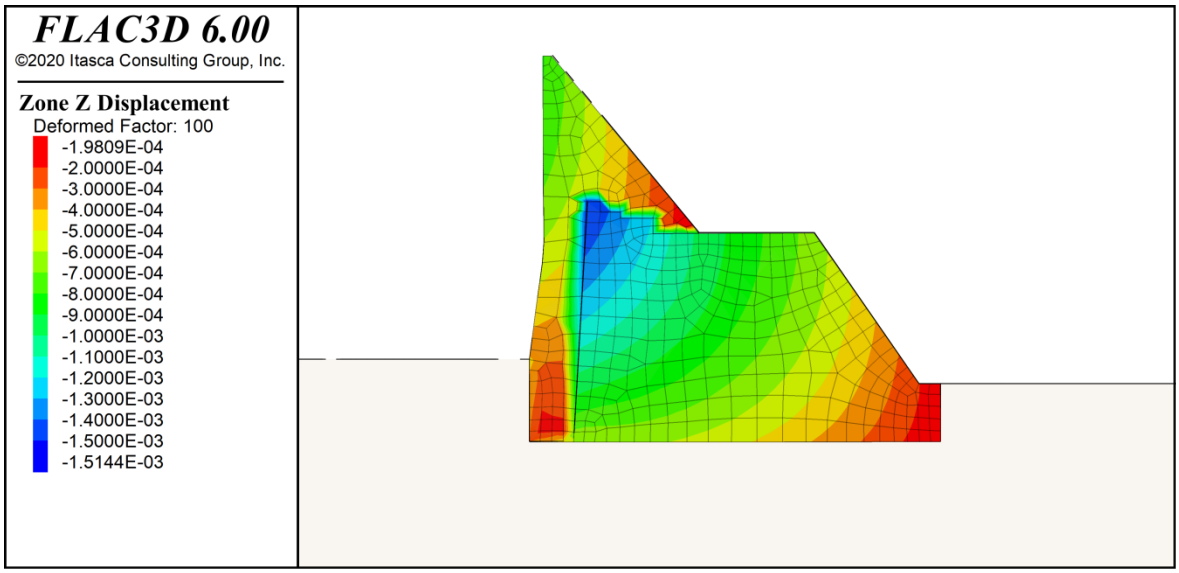
Máxima compresión en cimentación



Máximo desplazamiento horizontal en coronación

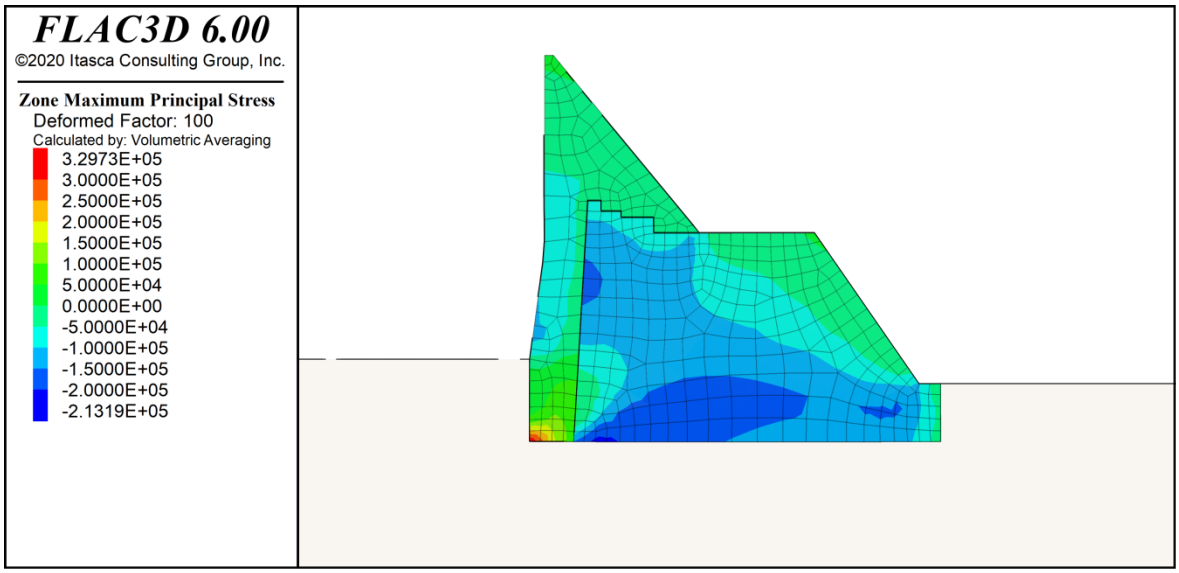


Máximo desplazamiento vertical en coronación

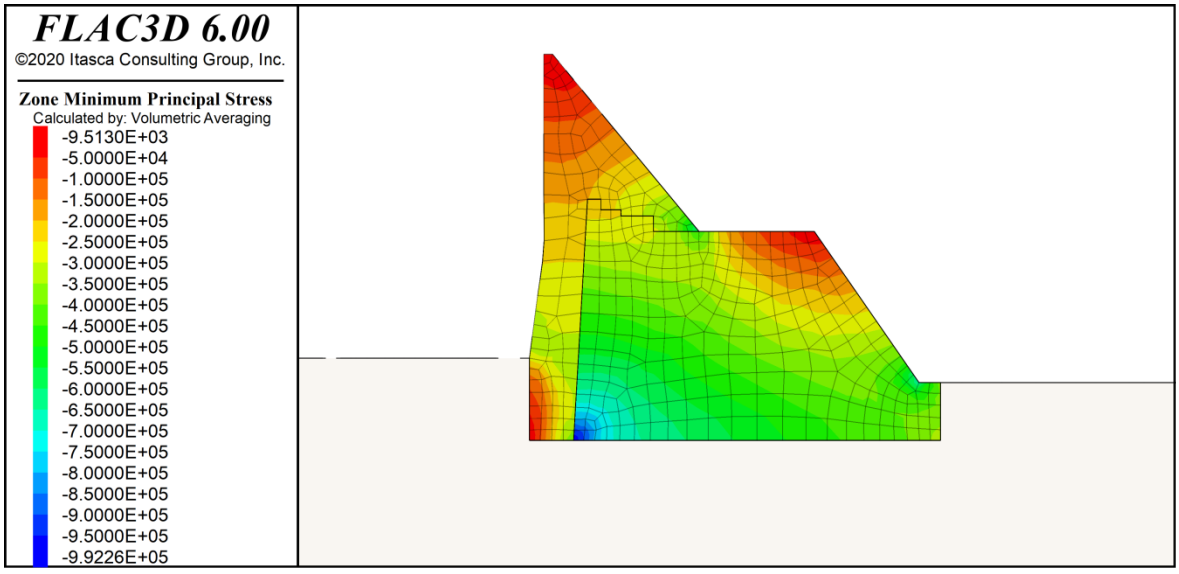


EMBALSE A COTA DE CORONACIÓN – M2D-C

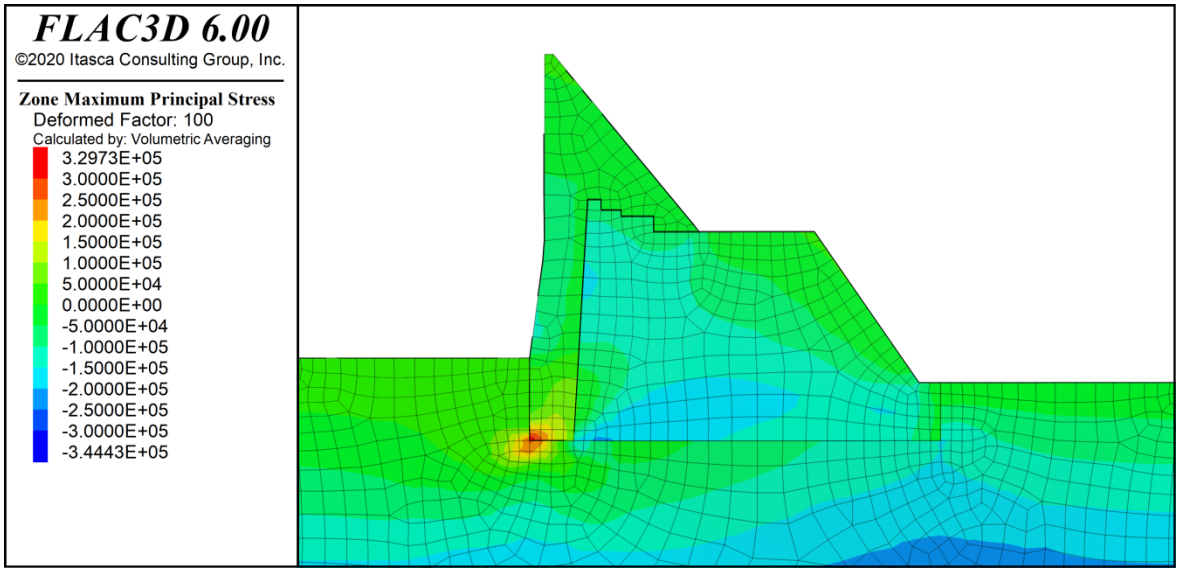
Máxima tracción cuerpo de presa



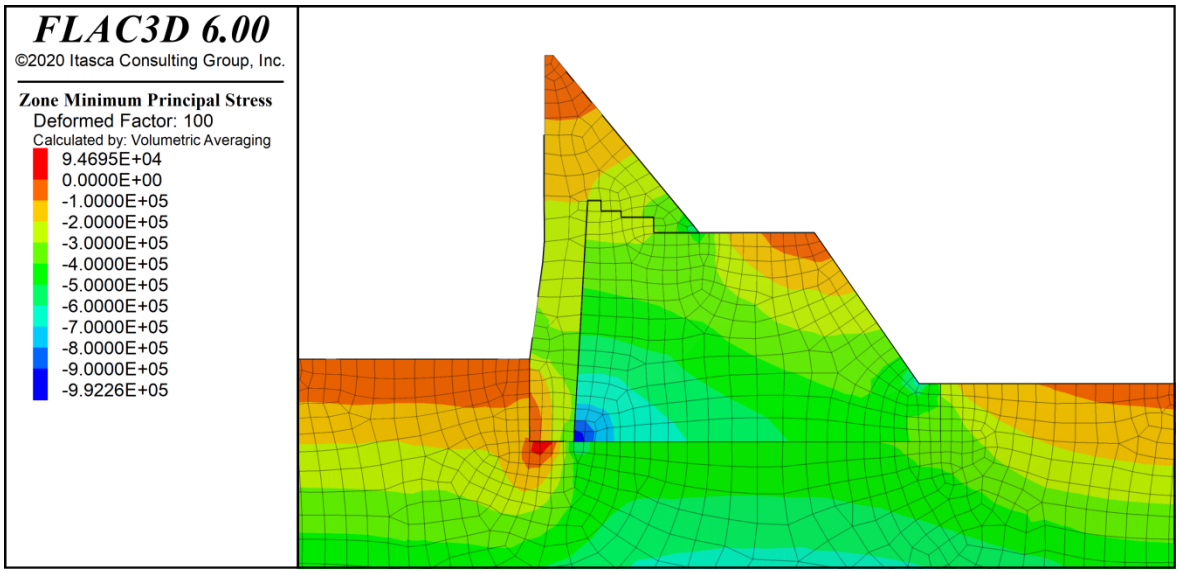
Máxima compresión cuerpo de presa



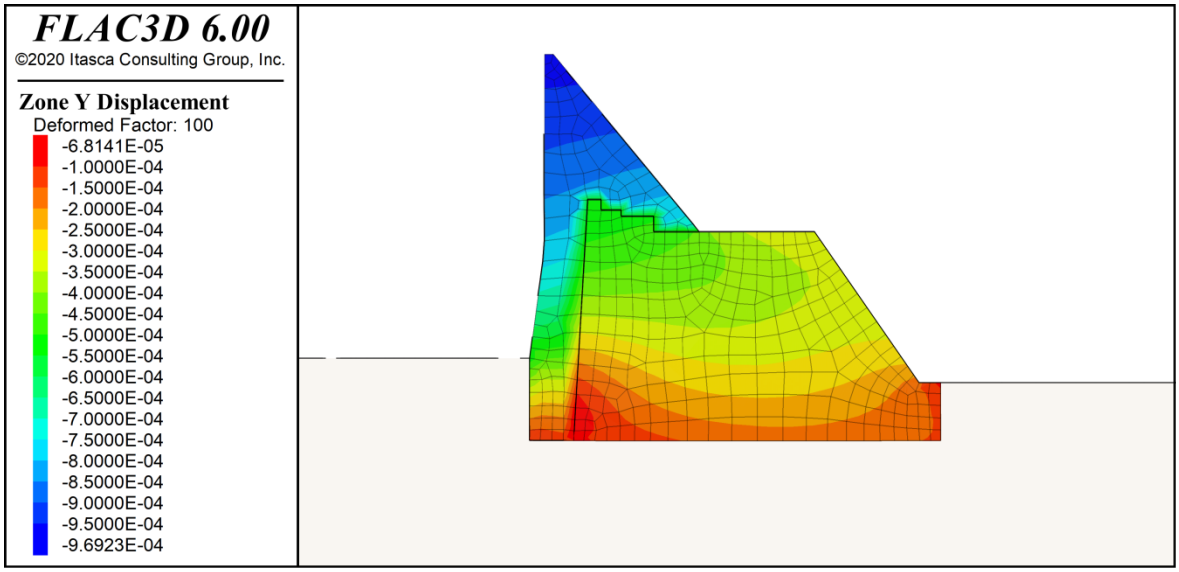
Máxima tracción en cimentación



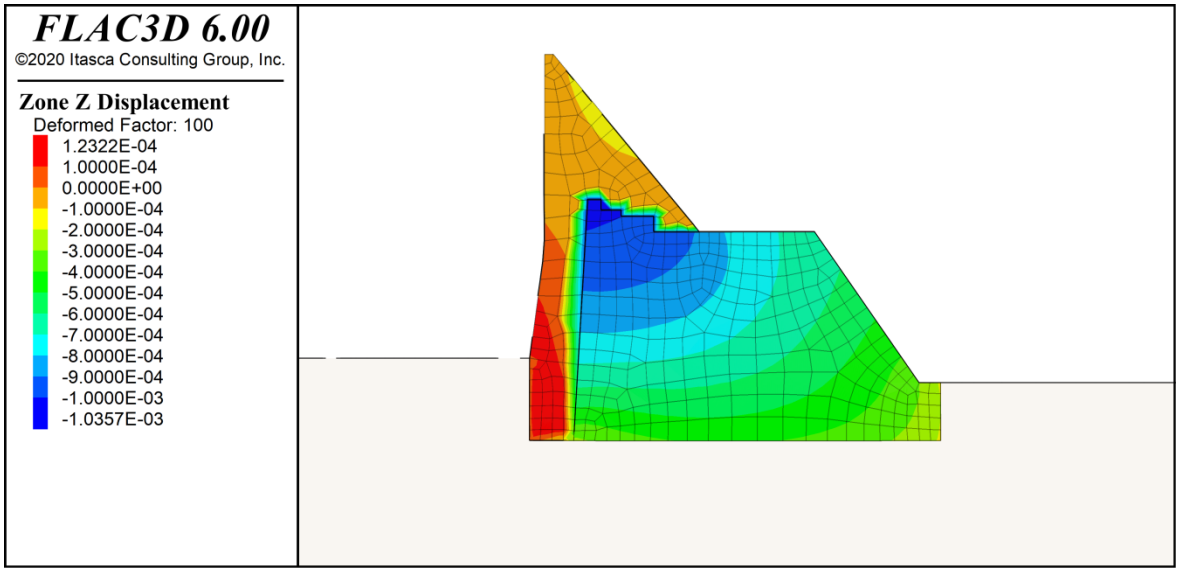
Máxima compresión en cimentación



Máximo desplazamiento horizontal en coronación

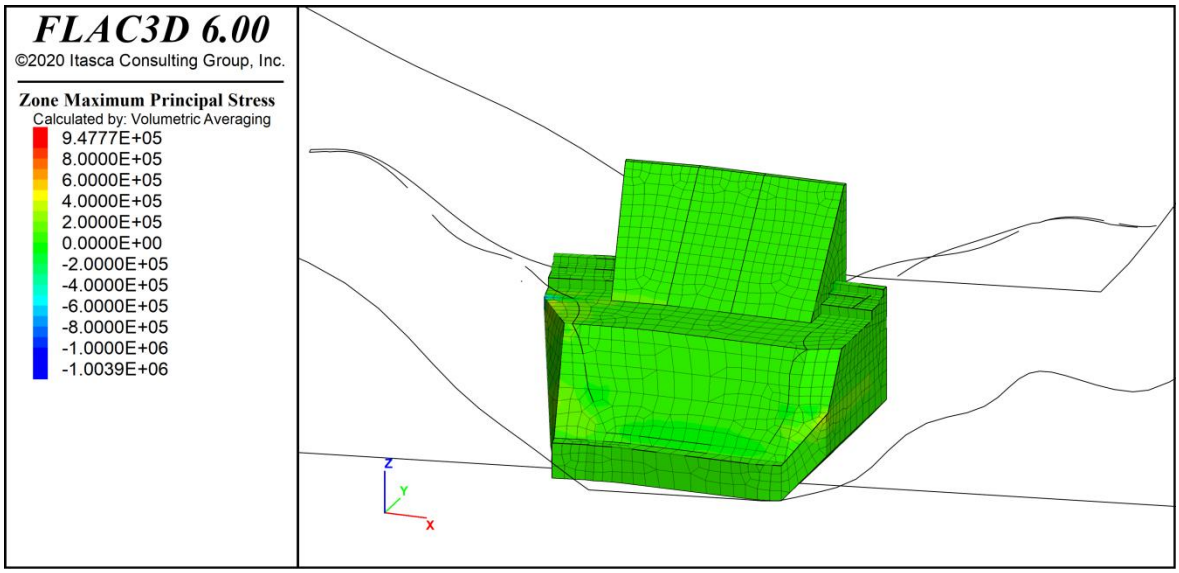


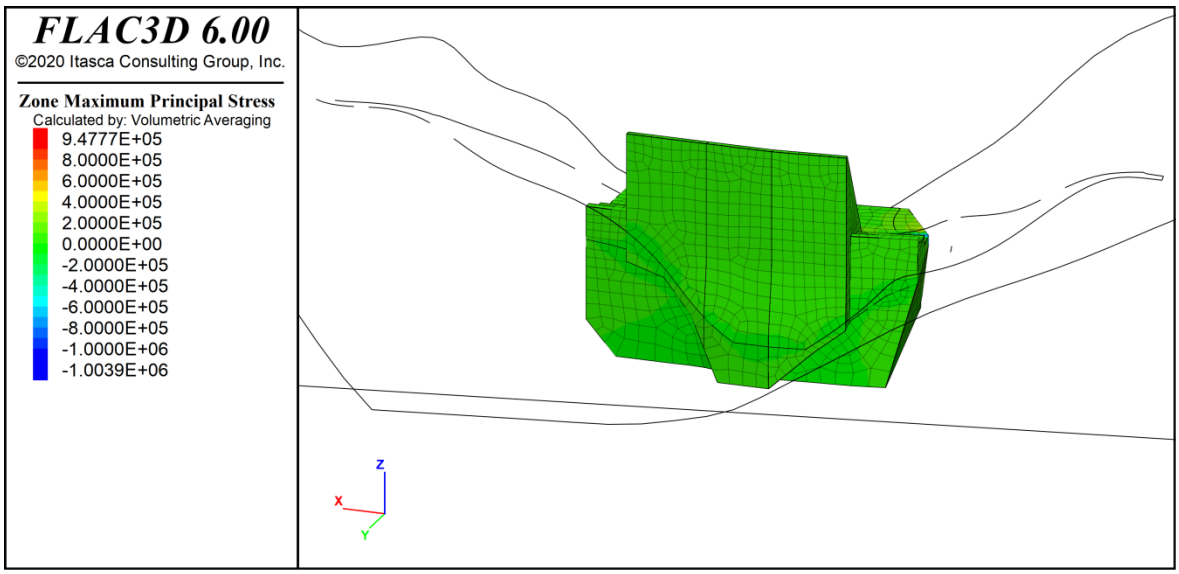
Máximo desplazamiento vertical en coronación



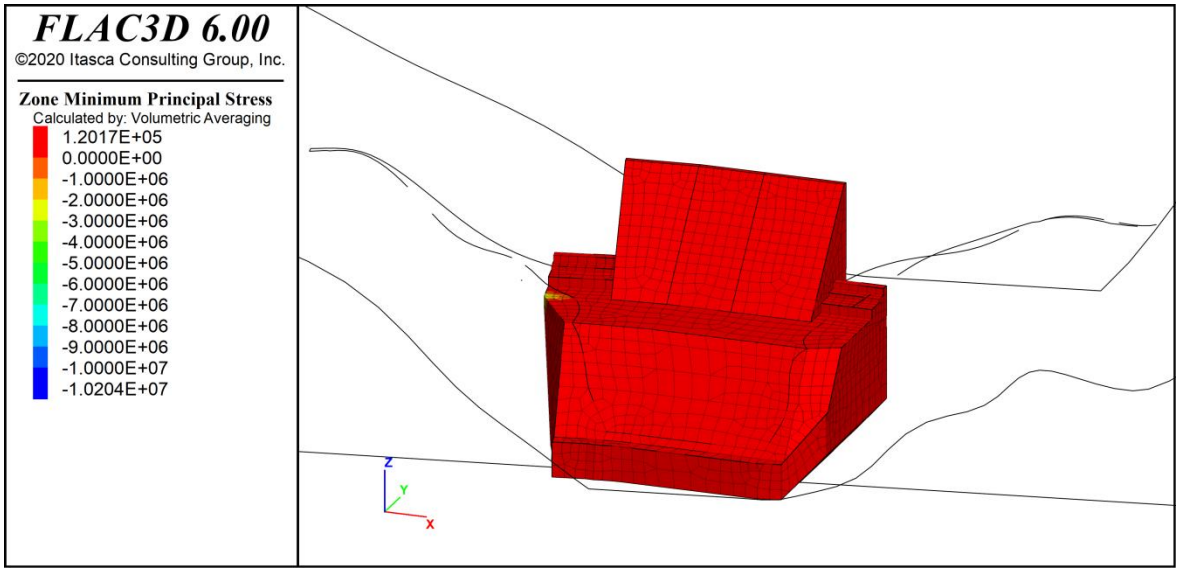
EMBALSE VACÍO – M3D-SIMP

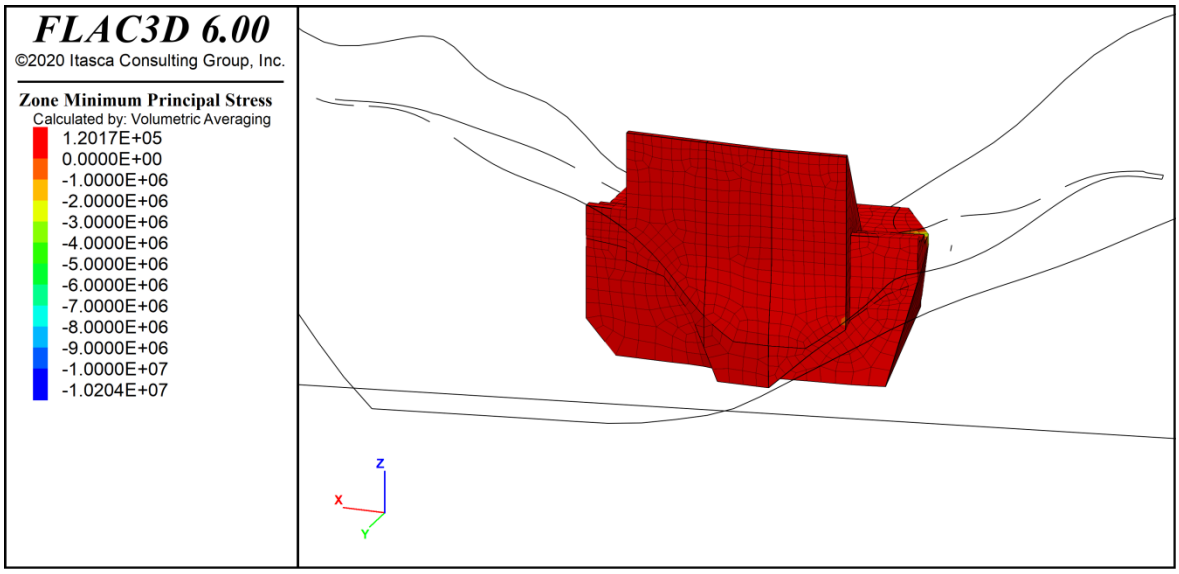
Máxima tracción cuerpo de presa



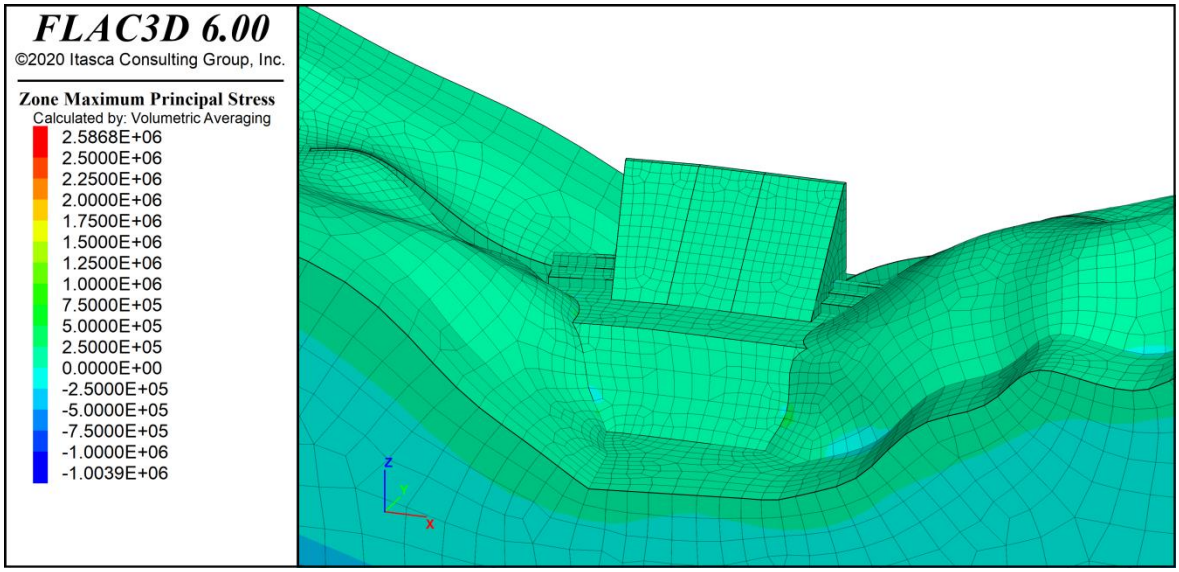


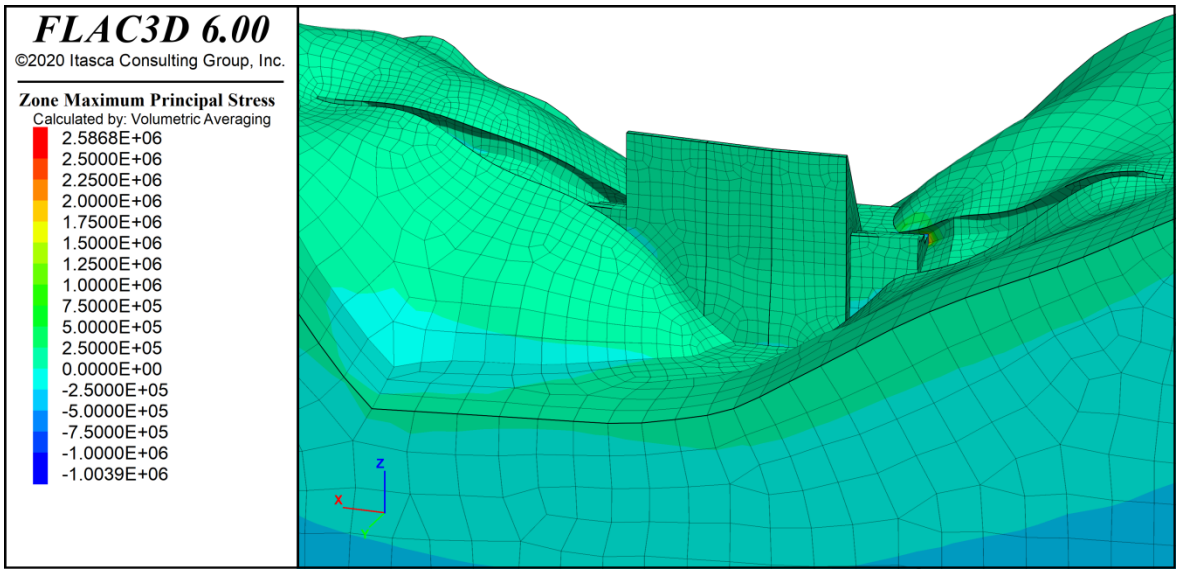
Máxima compresión cuerpo de presa



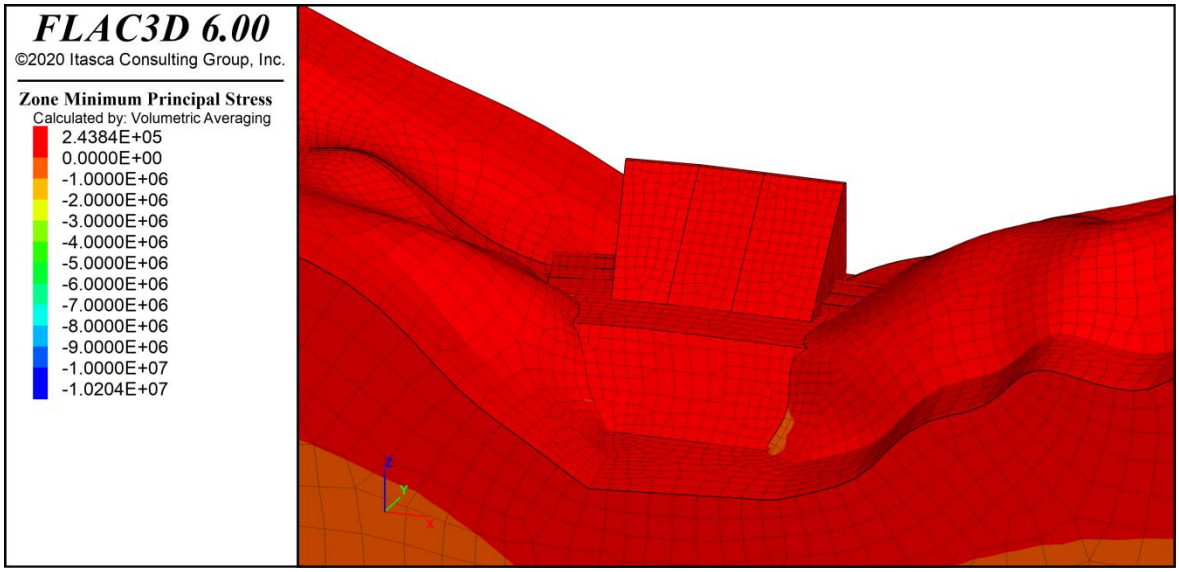


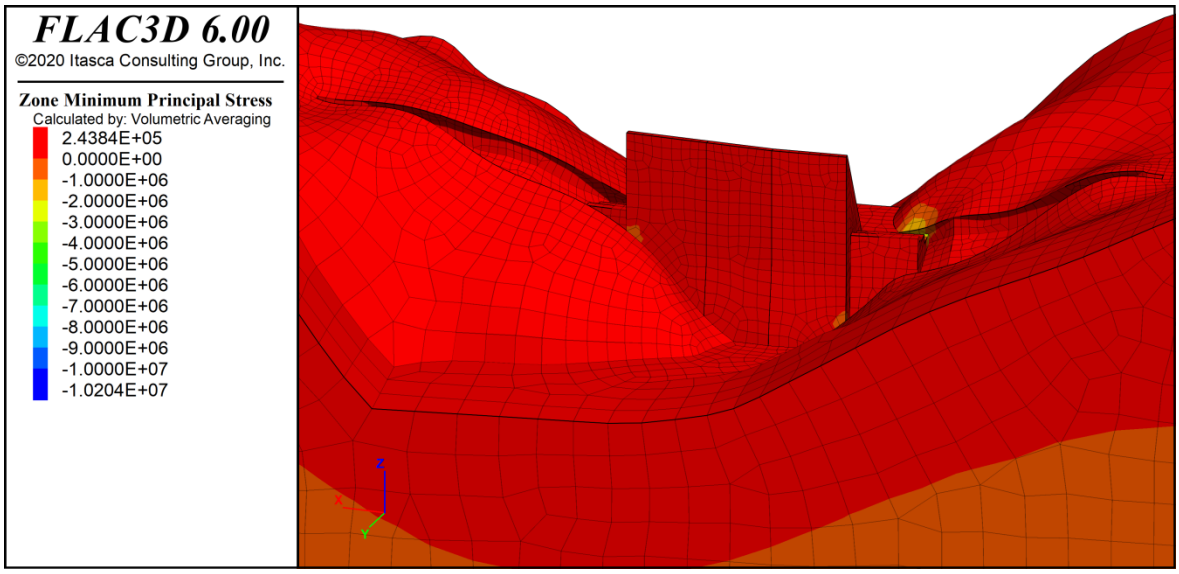
Máxima tracción en cimentación



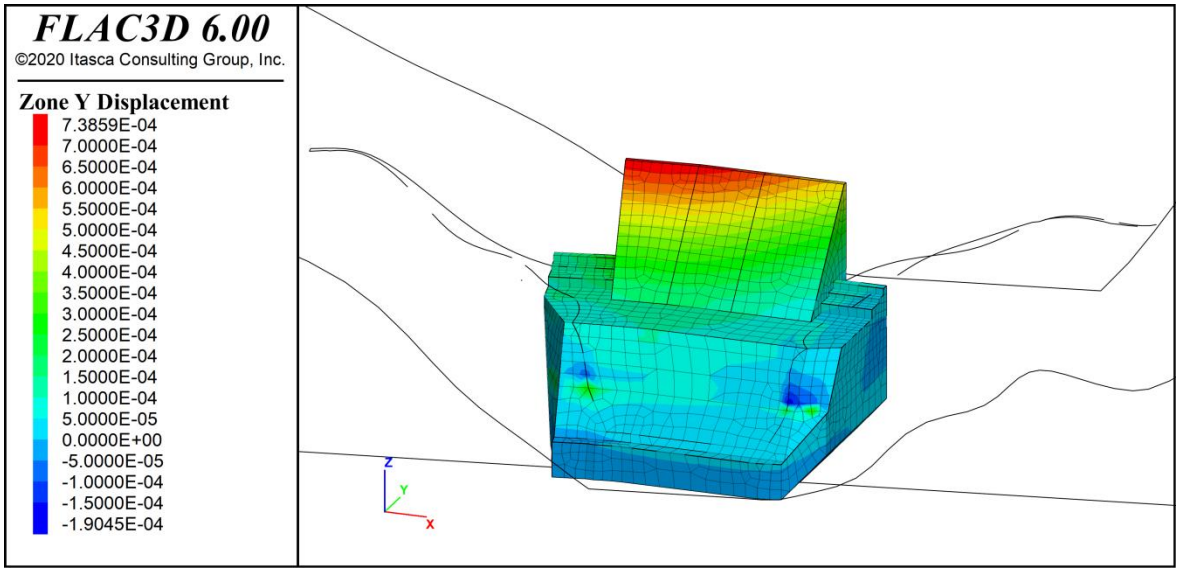


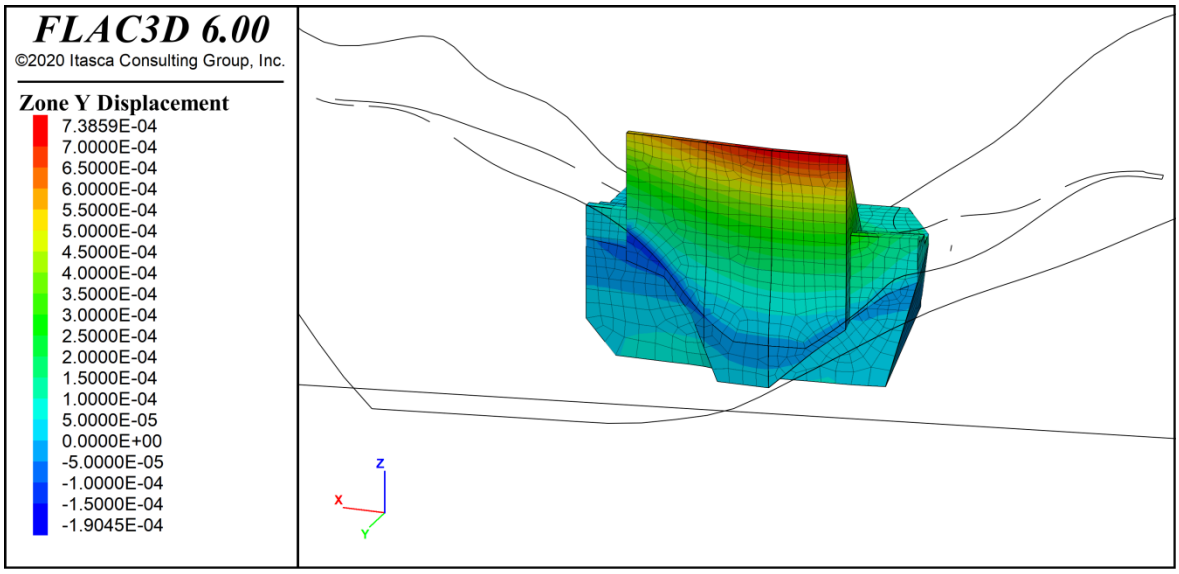
Máxima compresión en cimentación



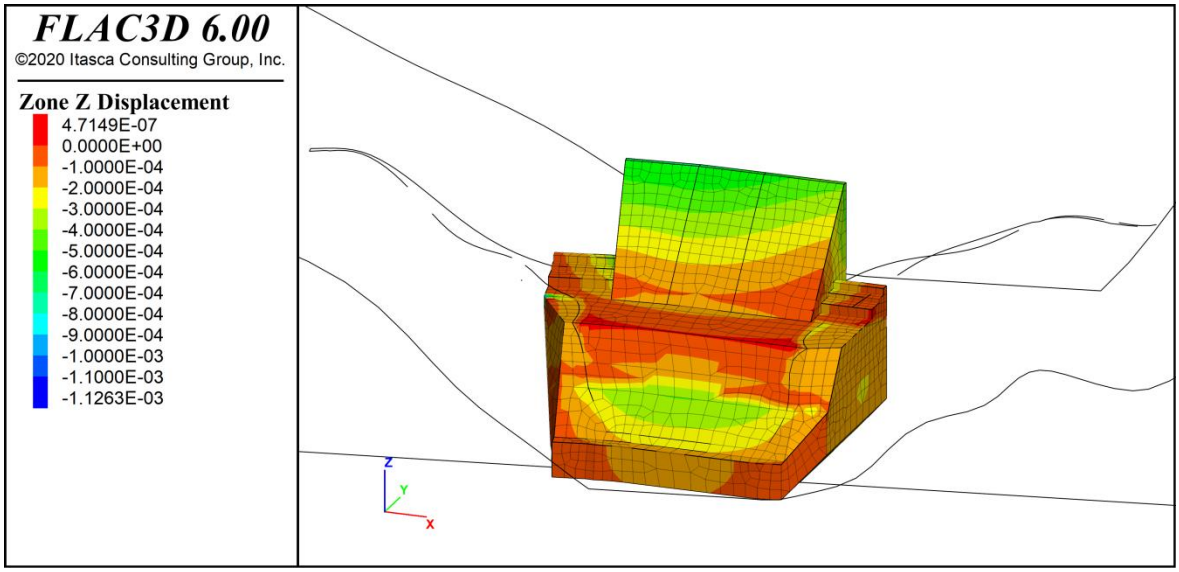


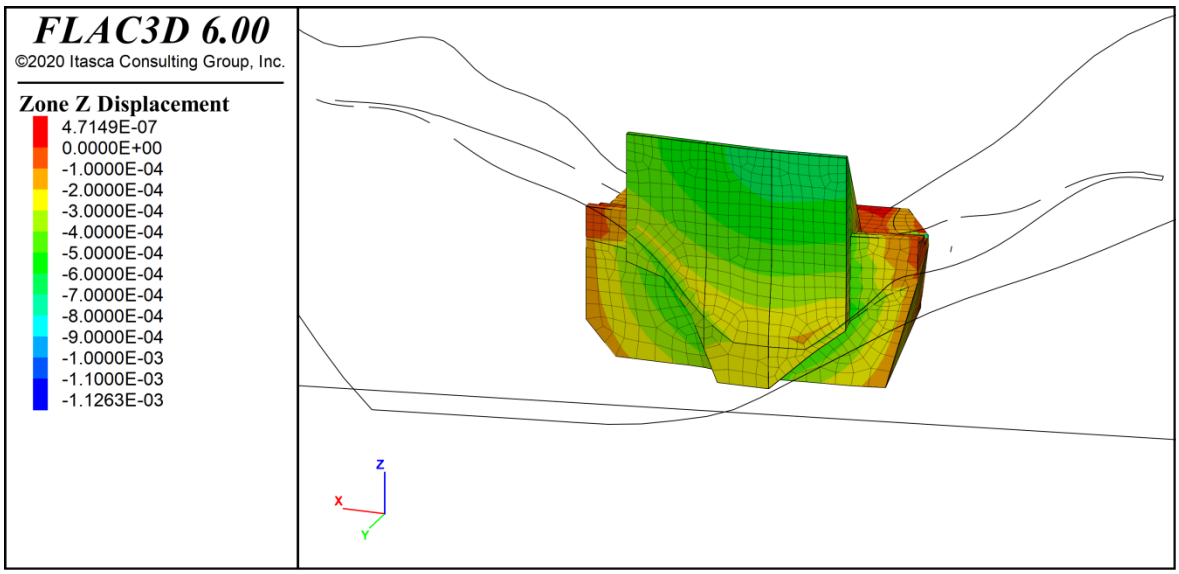
Máximo desplazamiento horizontal en coronación





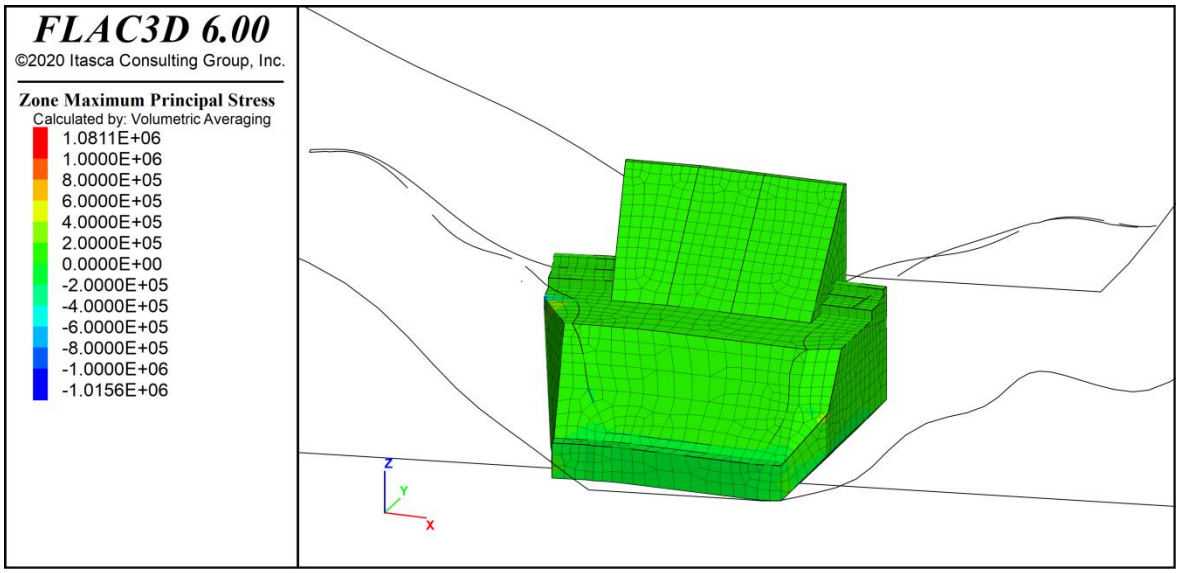
Máximo desplazamiento vertical en coronación

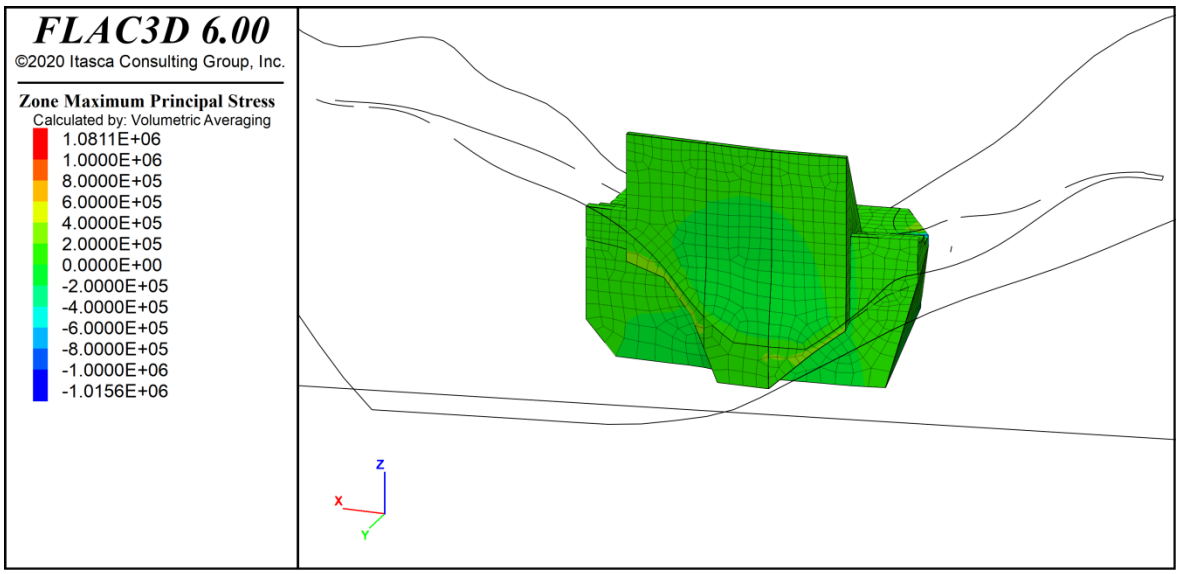




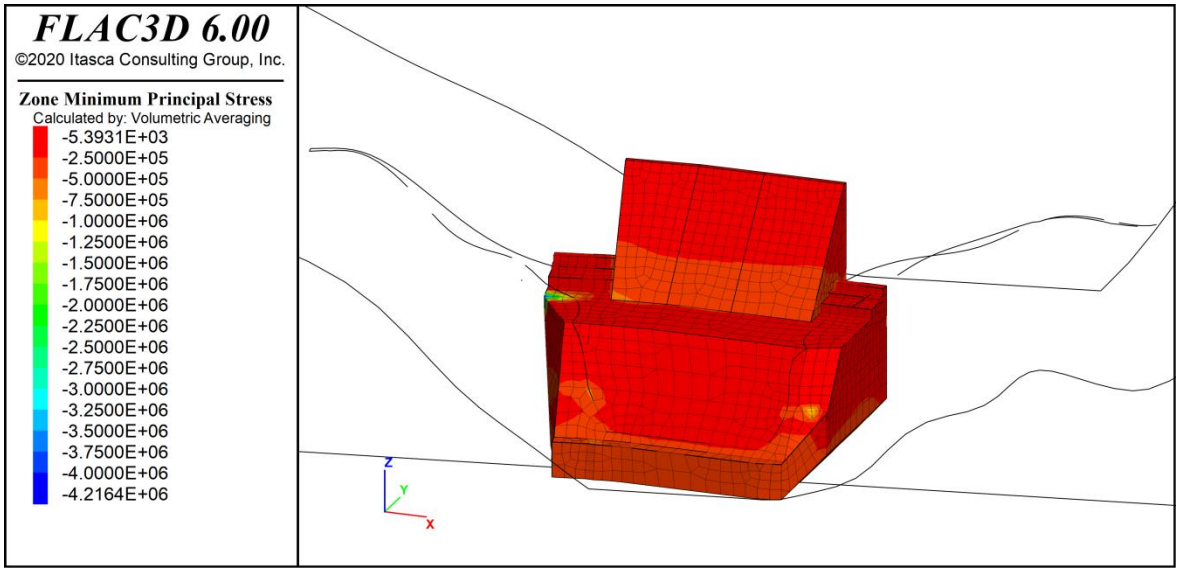
EMBALSE A COTA DE CORONACIÓN – M3D-SIMP

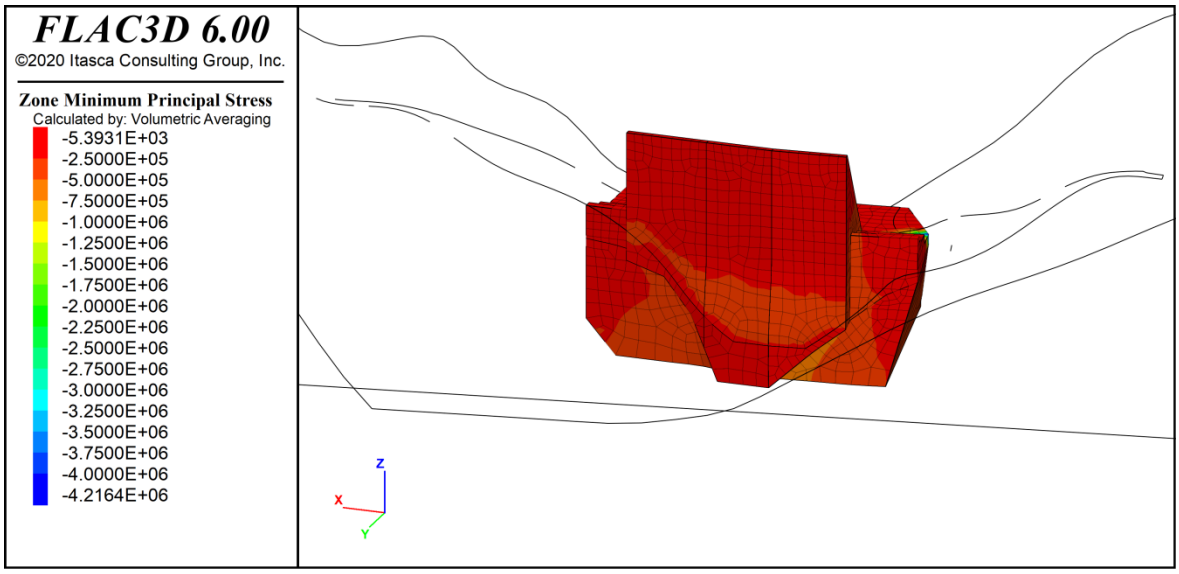
Máxima tracción cuerpo de presa



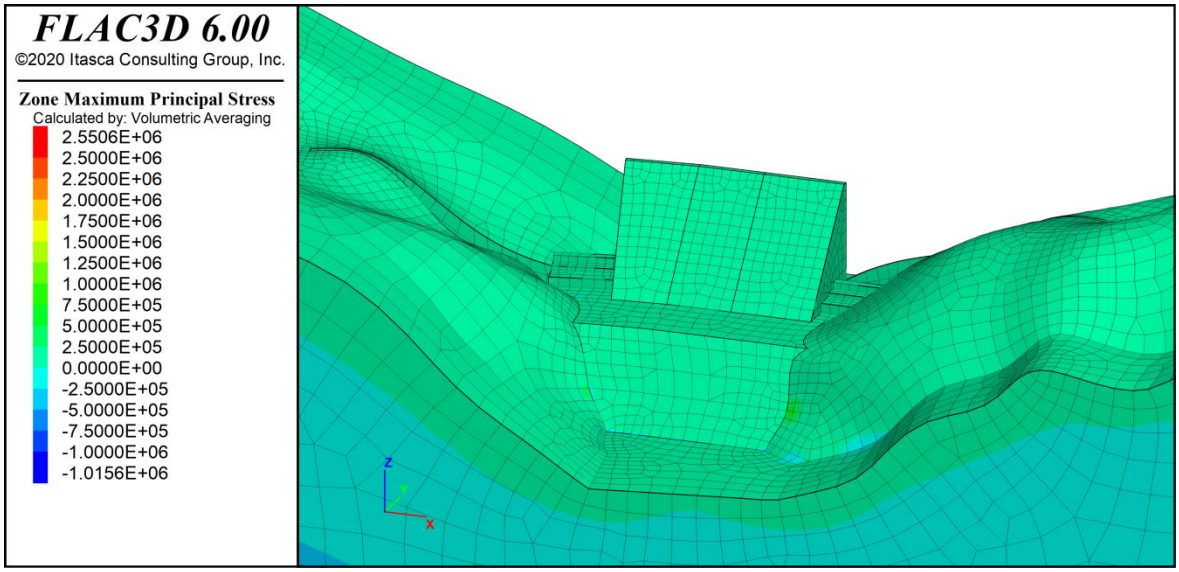


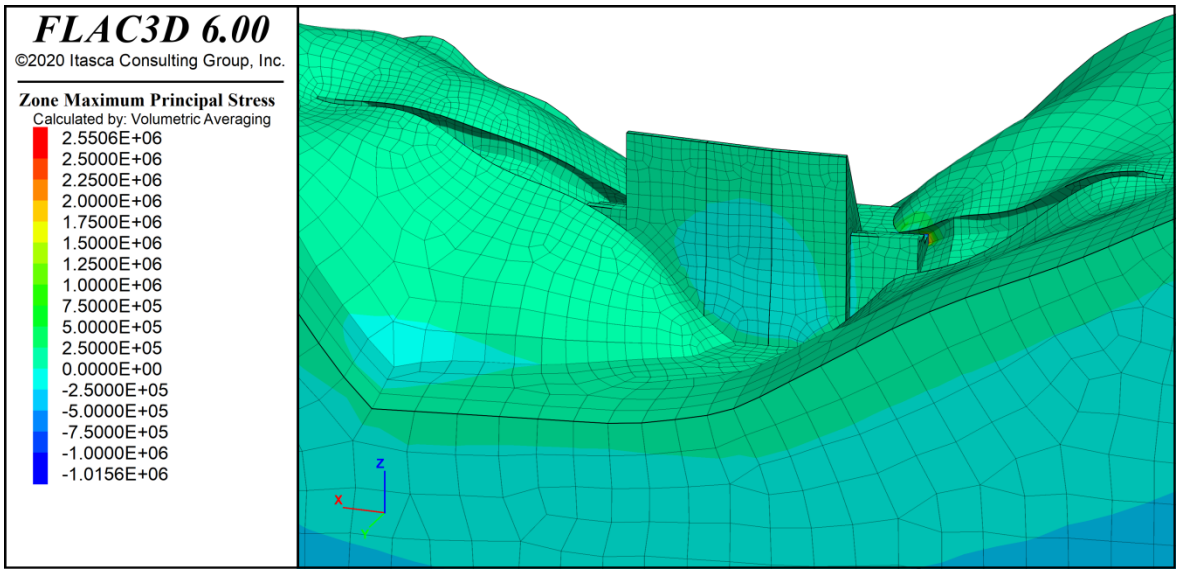
Máxima compresión cuerpo de presa



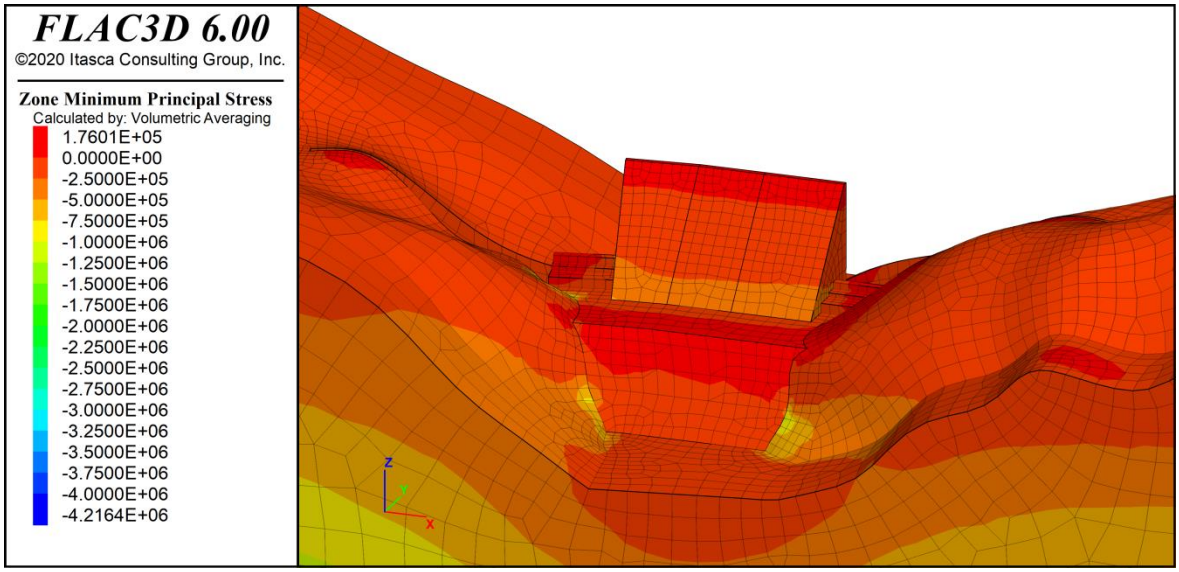


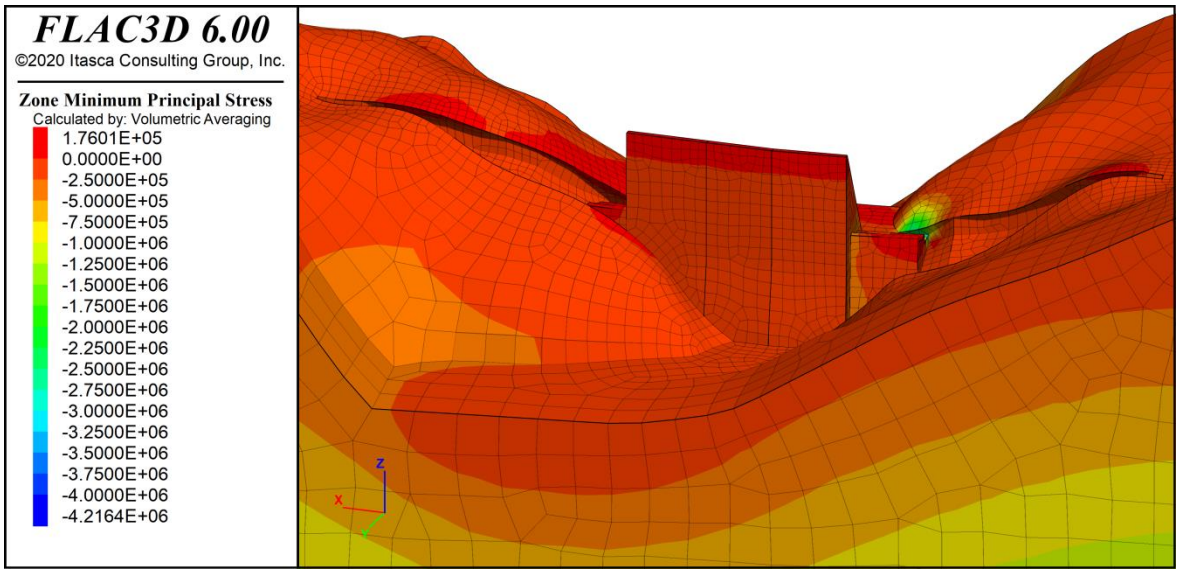
Máxima tracción en cimentación



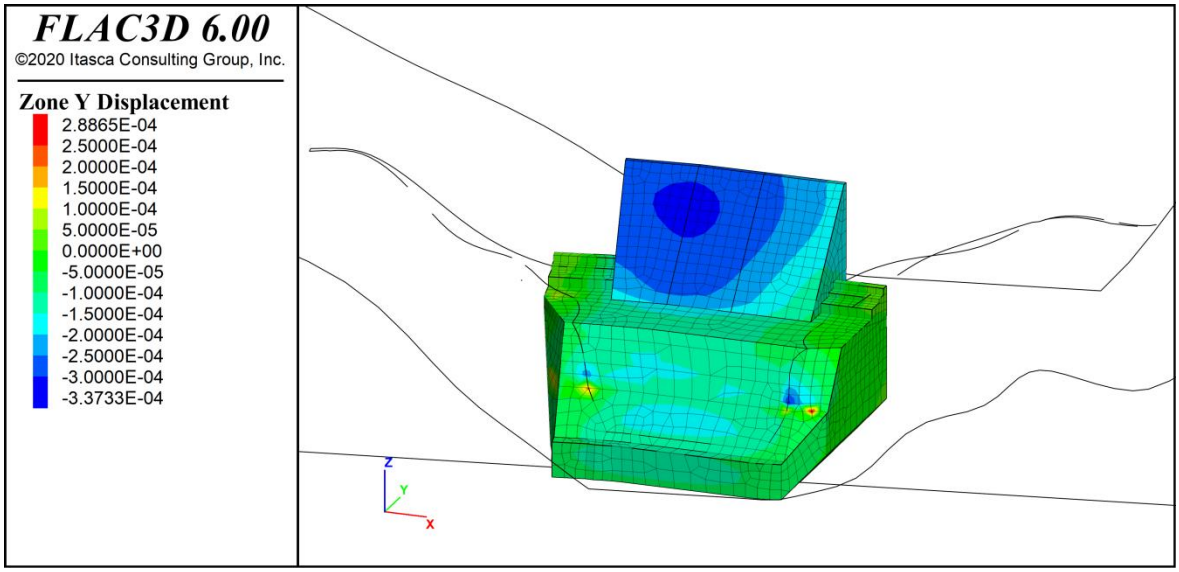


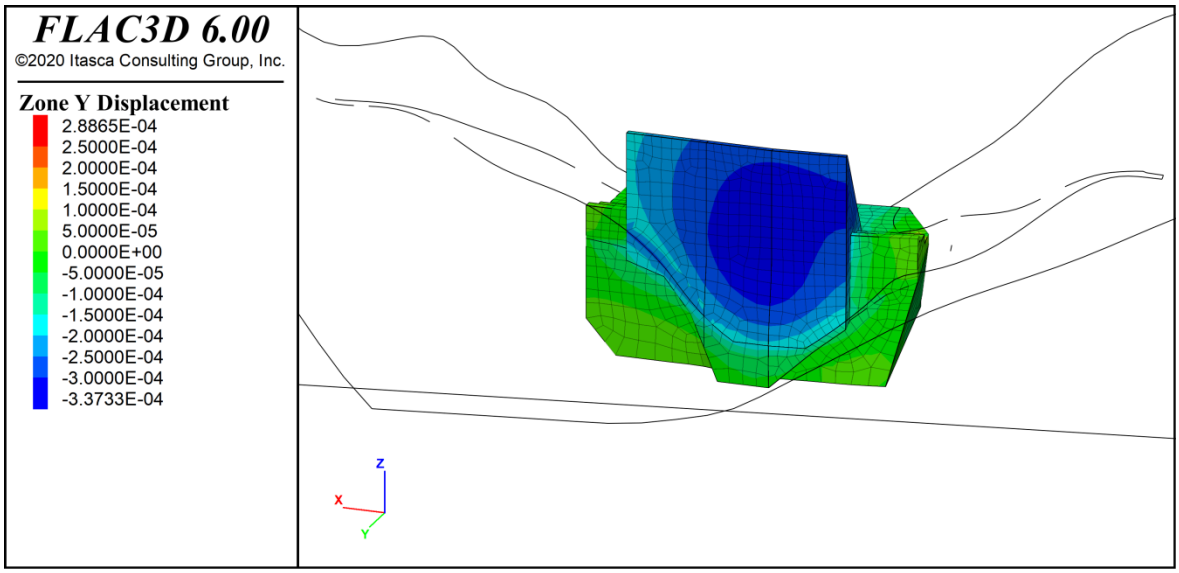
Máxima compresión en cimentación



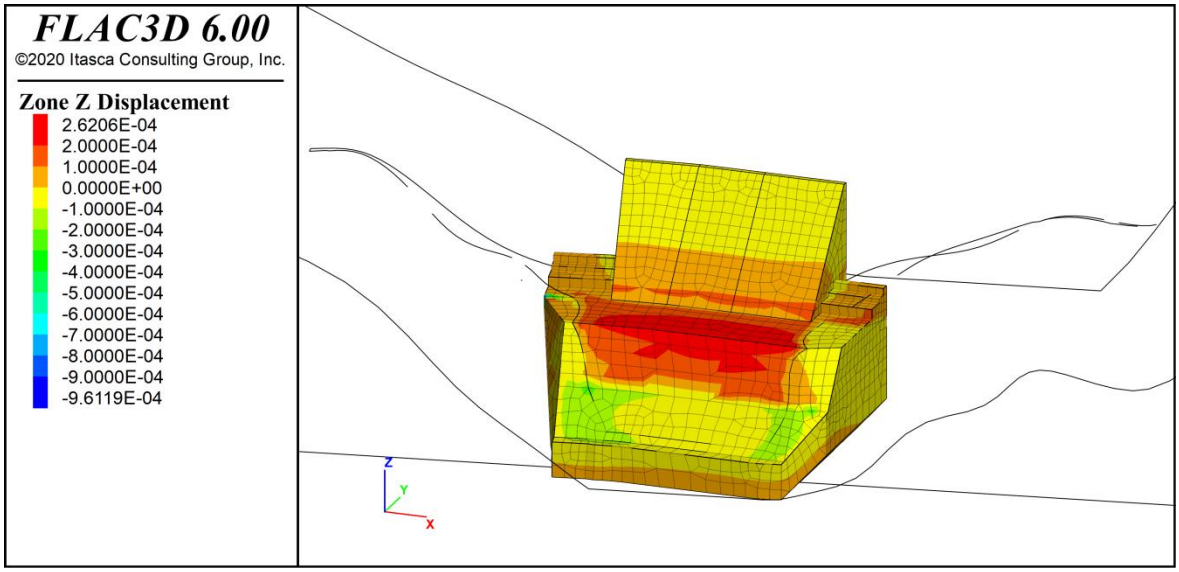


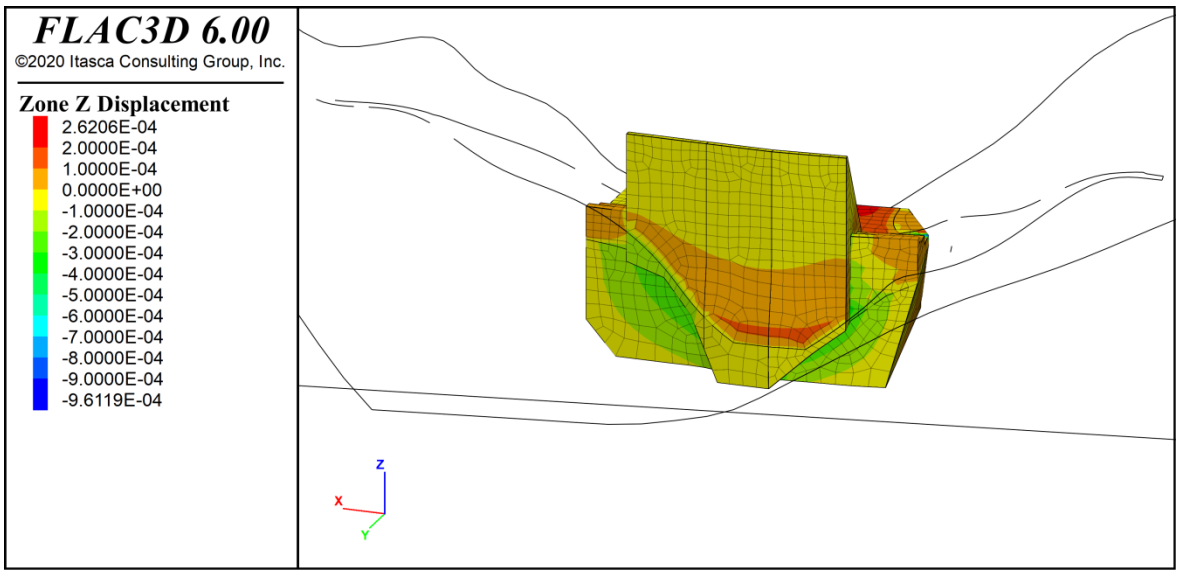
Máximo desplazamiento horizontal en coronación





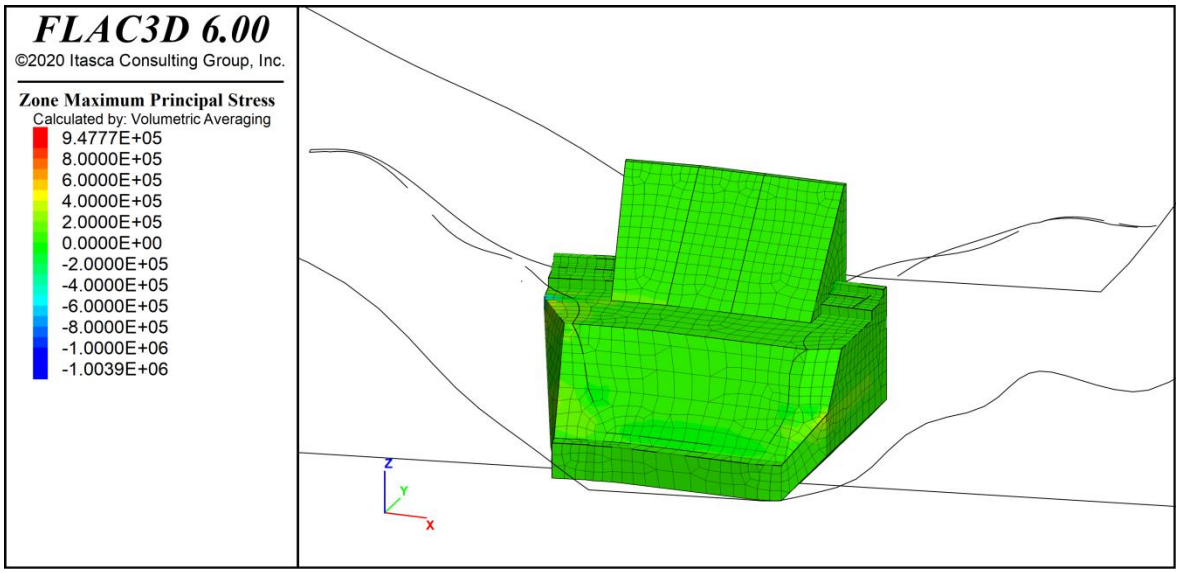
Máximo desplazamiento vertical en coronación

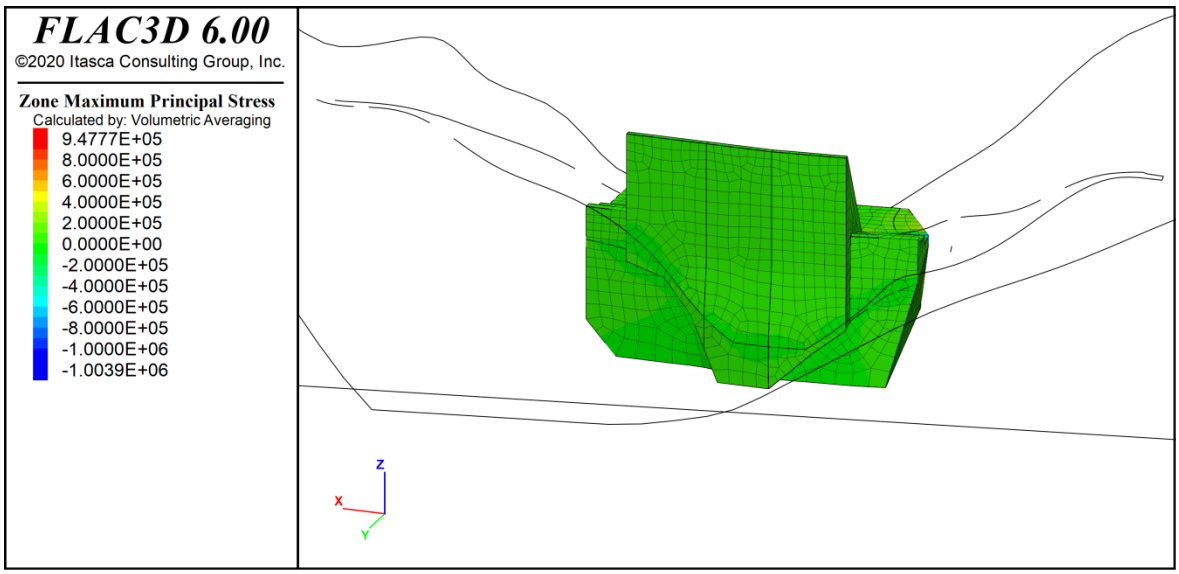




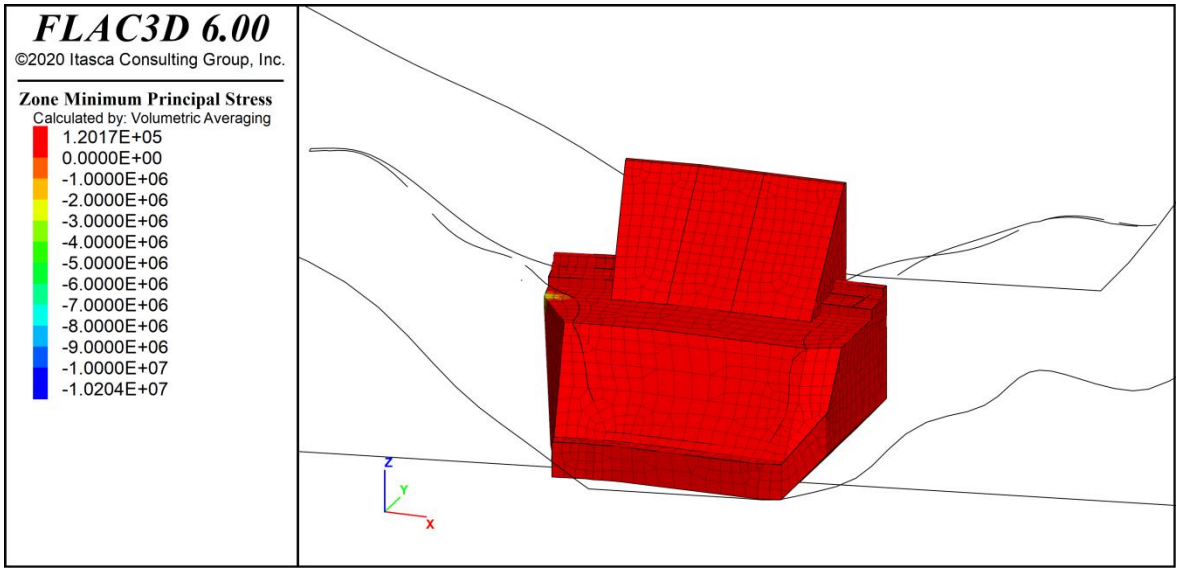
EMBALSE VACÍO – M3D-COMPLETO

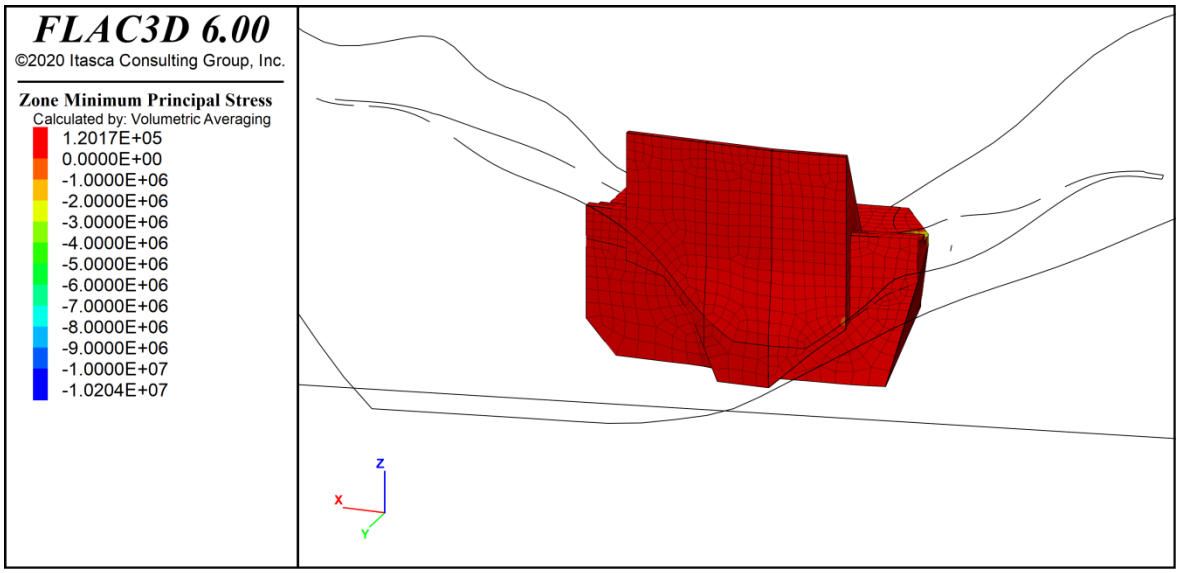
Máxima tracción cuerpo de presa



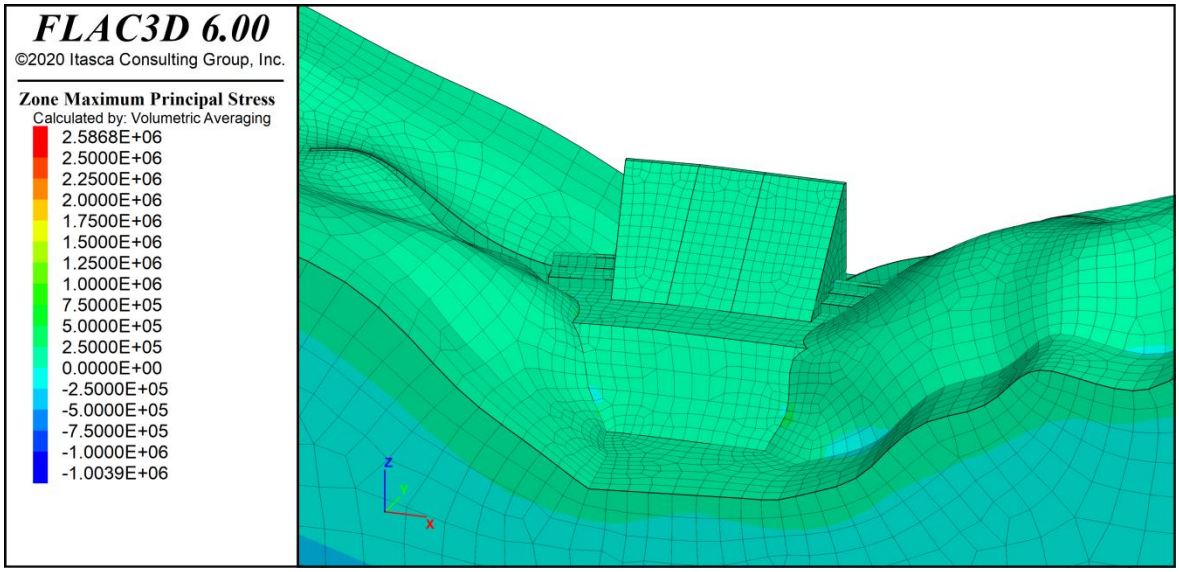


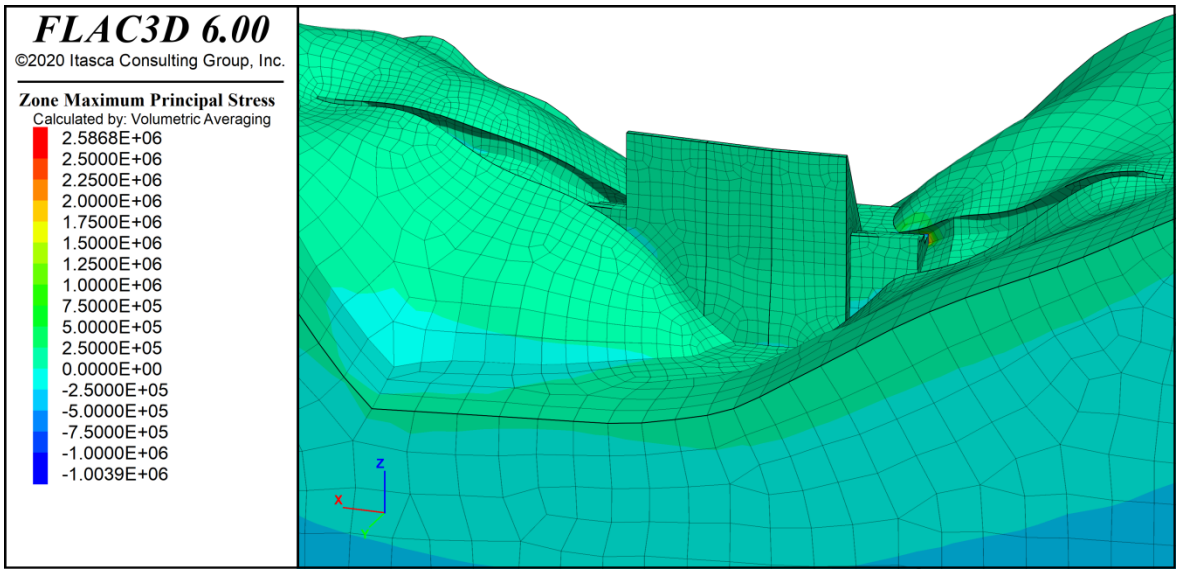
Máxima compresión cuerpo de presa



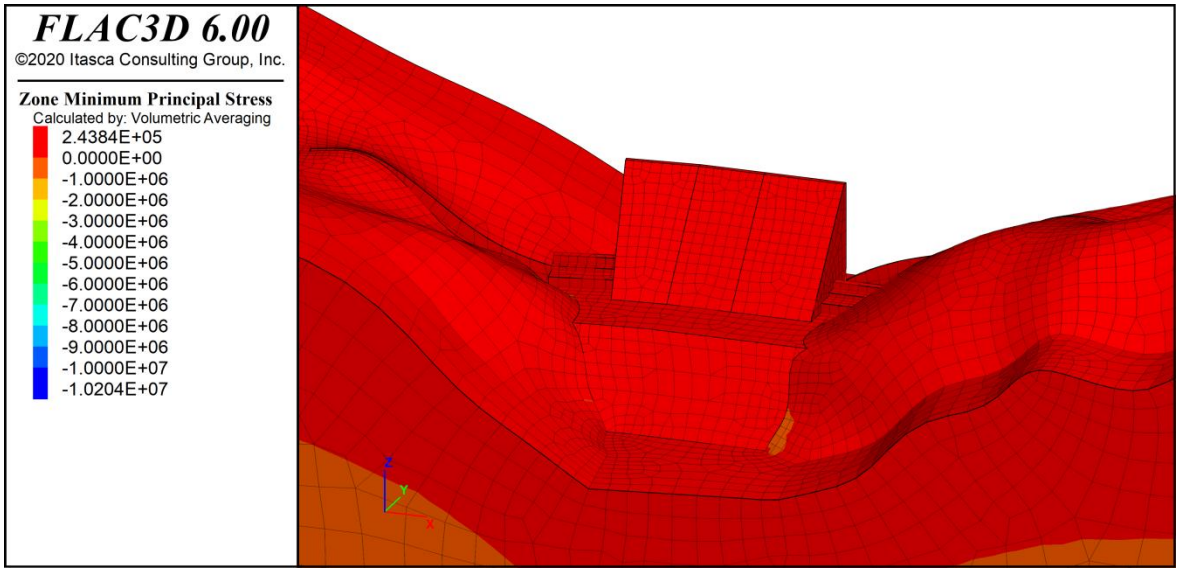


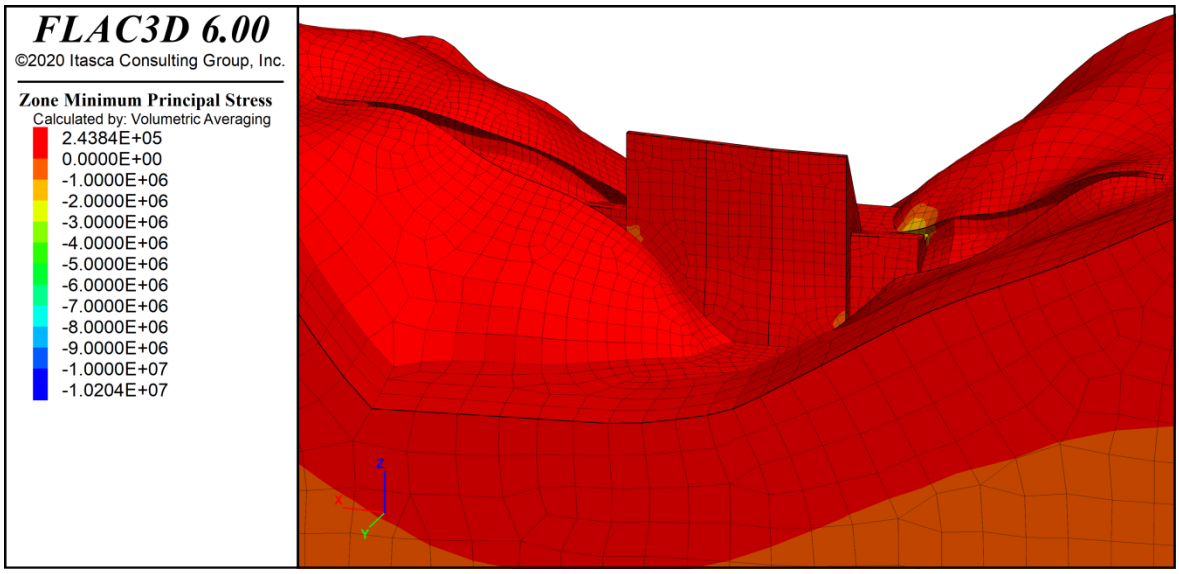
Máxima tracción en cimentación



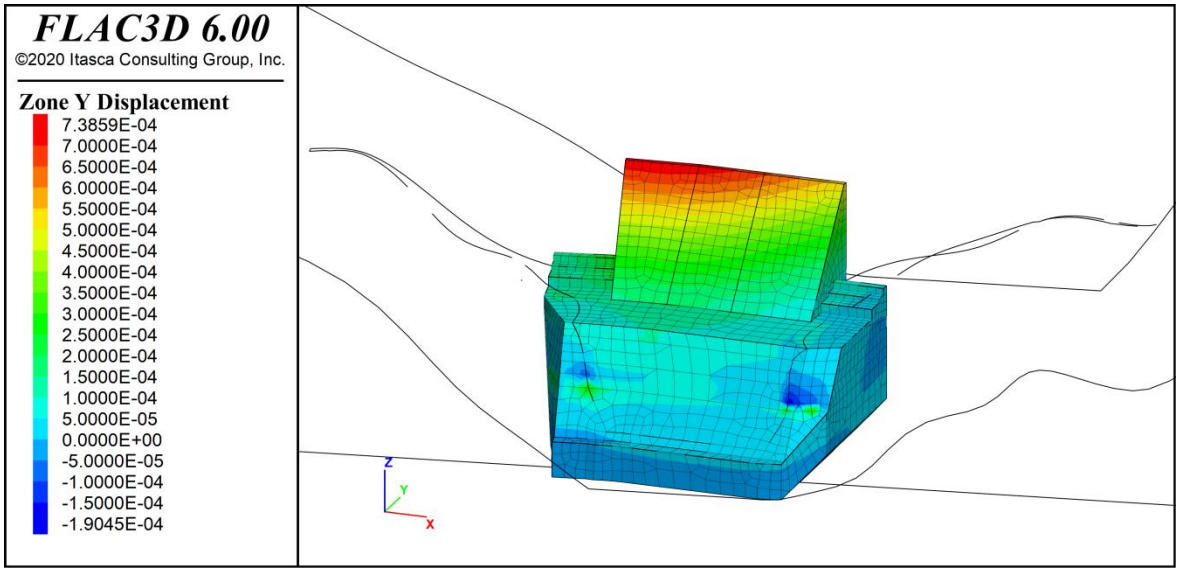


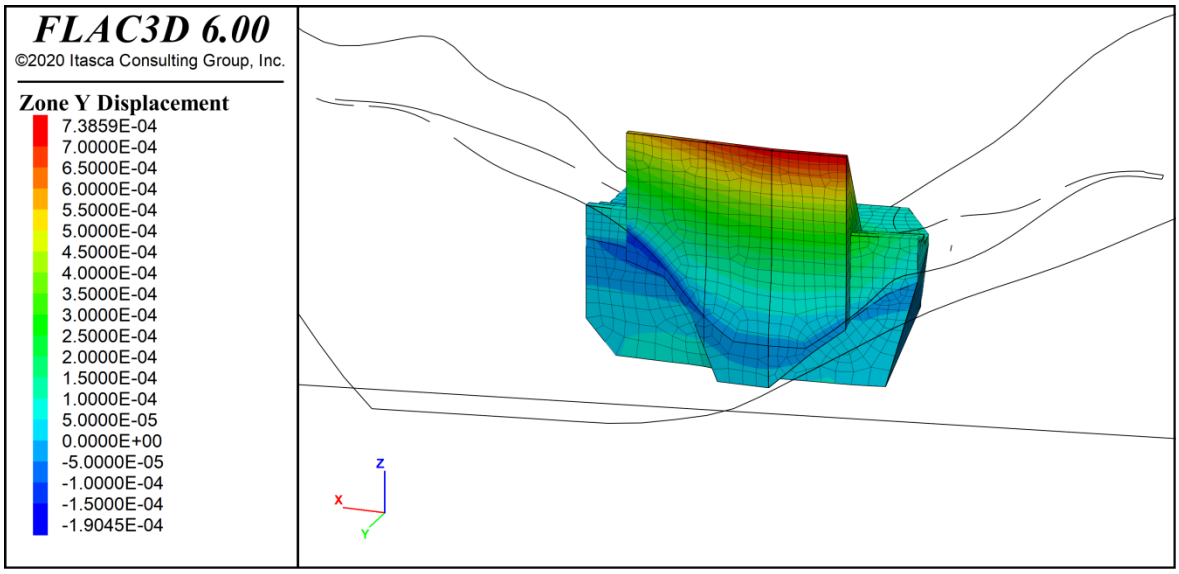
Máxima compresión en cimentación



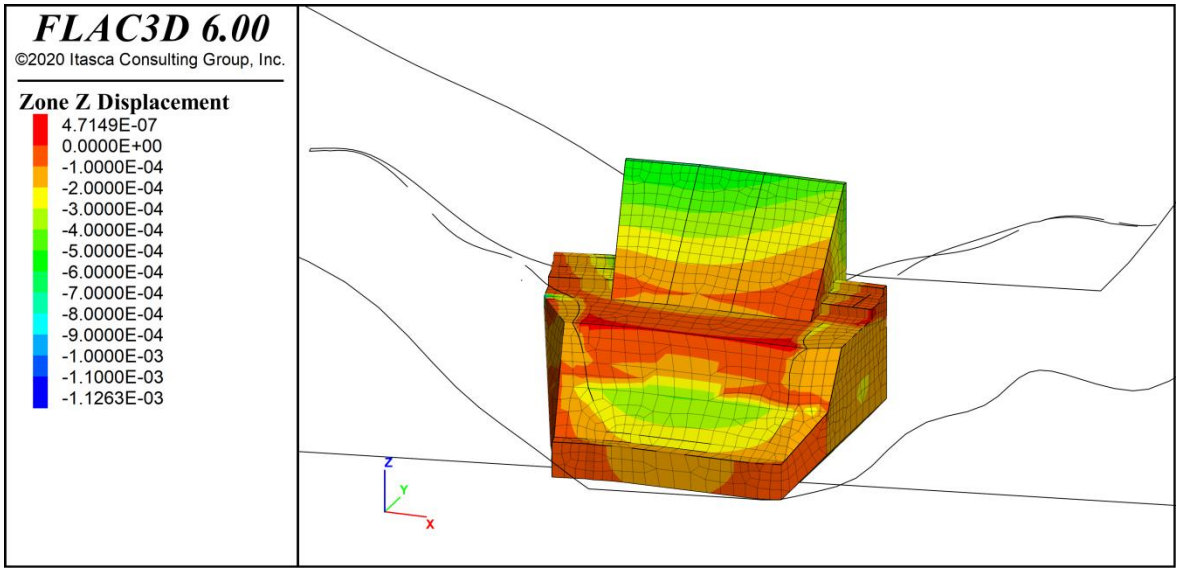


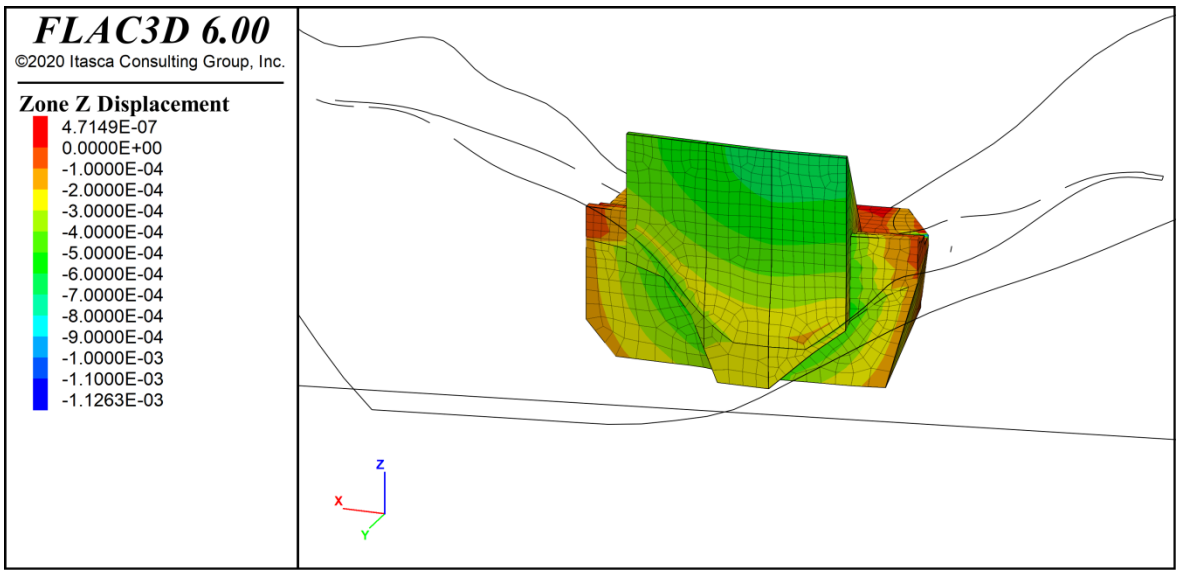
Máximo desplazamiento horizontal en coronación





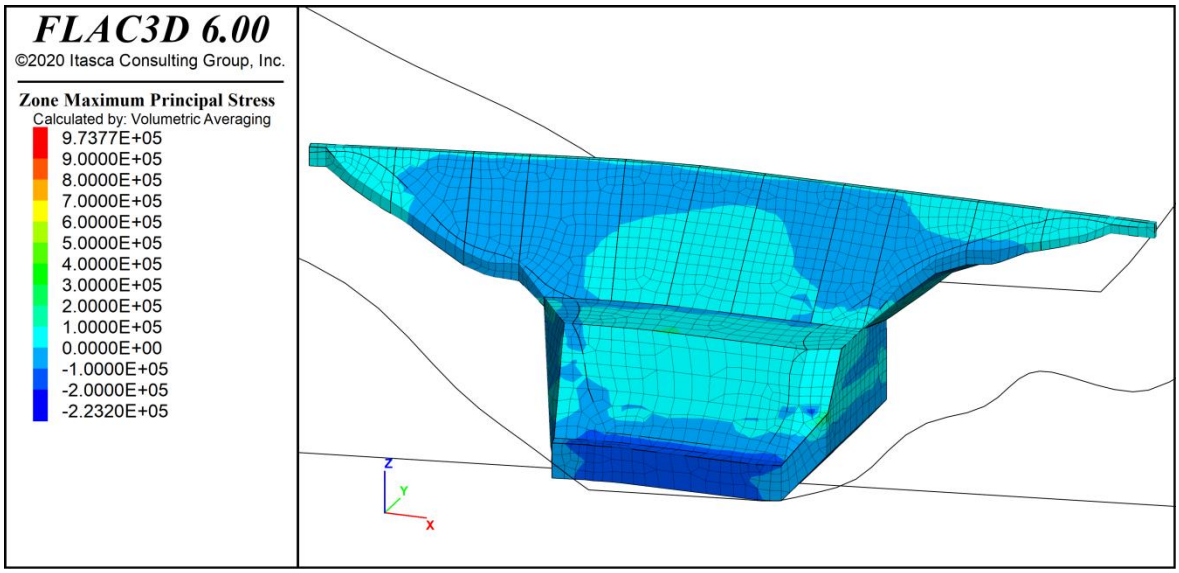
Máximo desplazamiento vertical en coronación

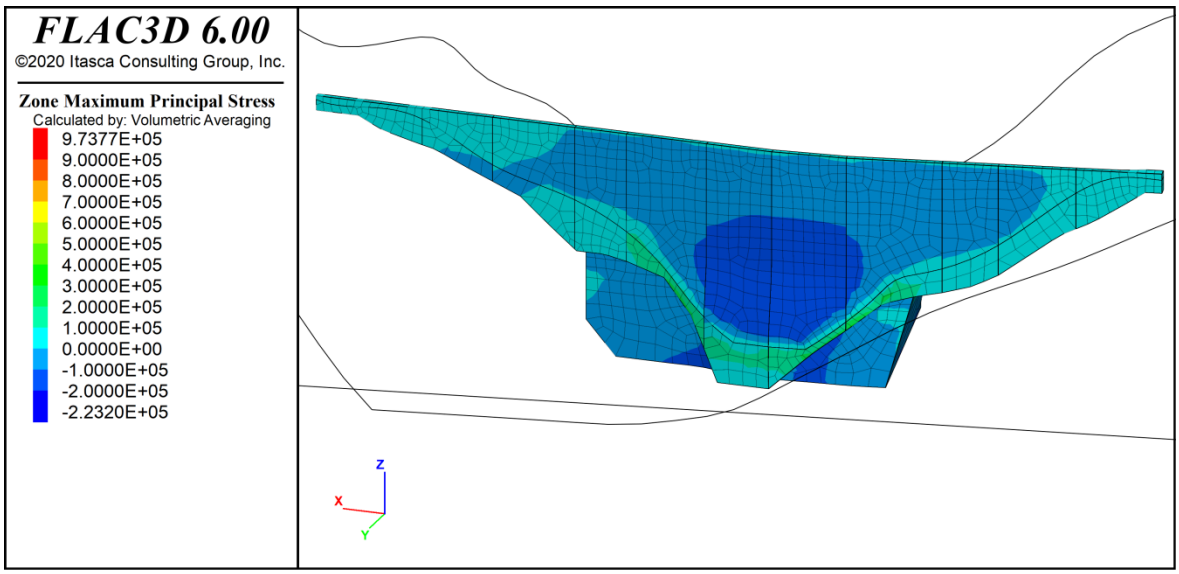




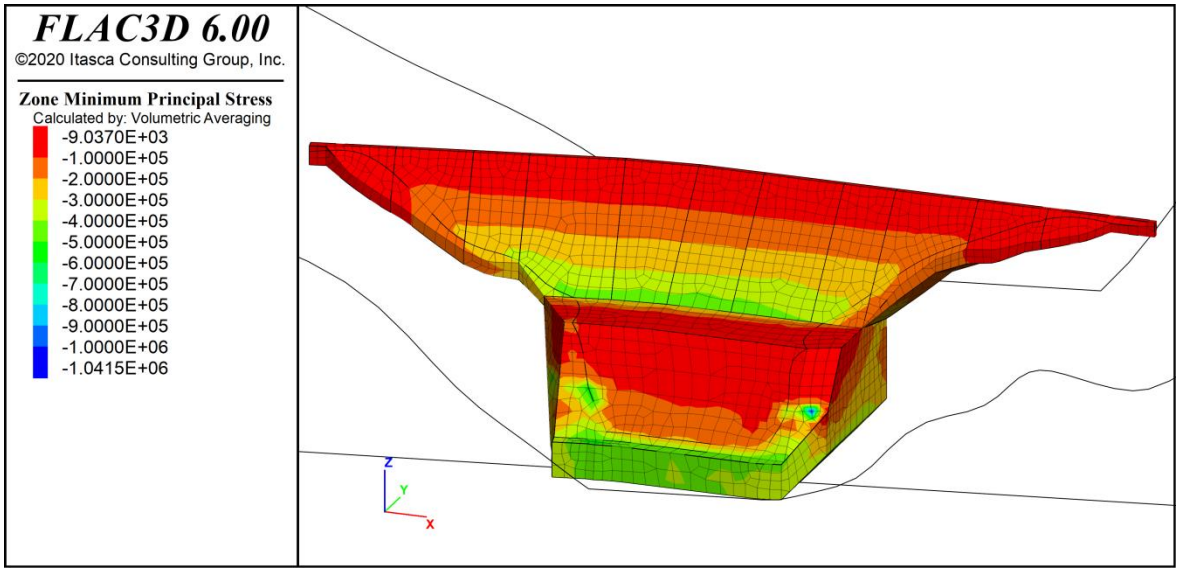
EMBALSE A COTA DE CORONACIÓN – M3D-COMPLETO

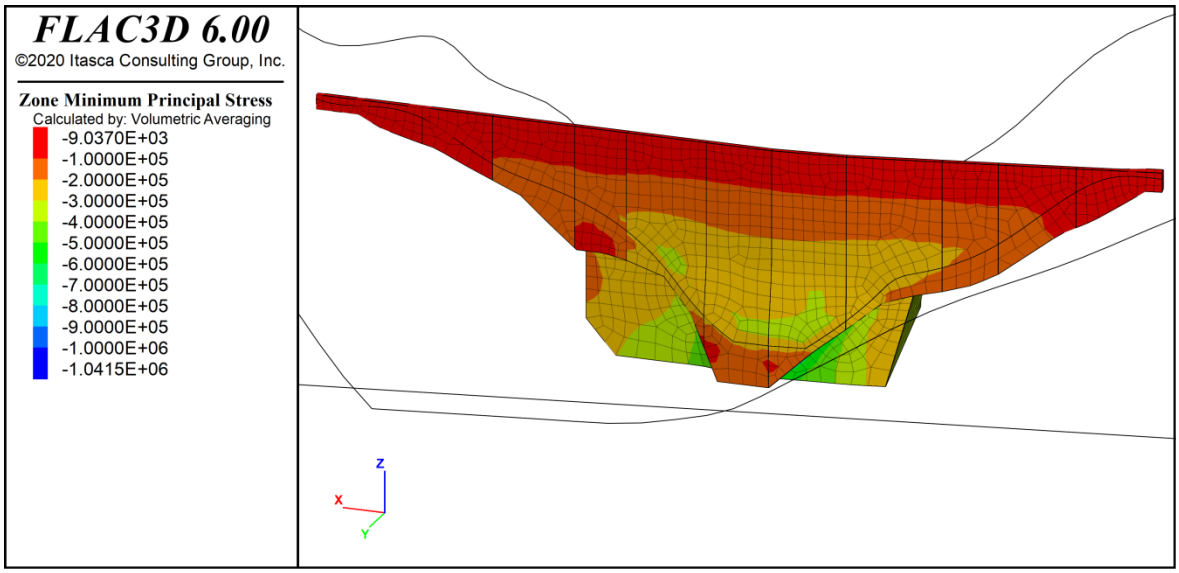
Máxima tracción cuerpo de presa



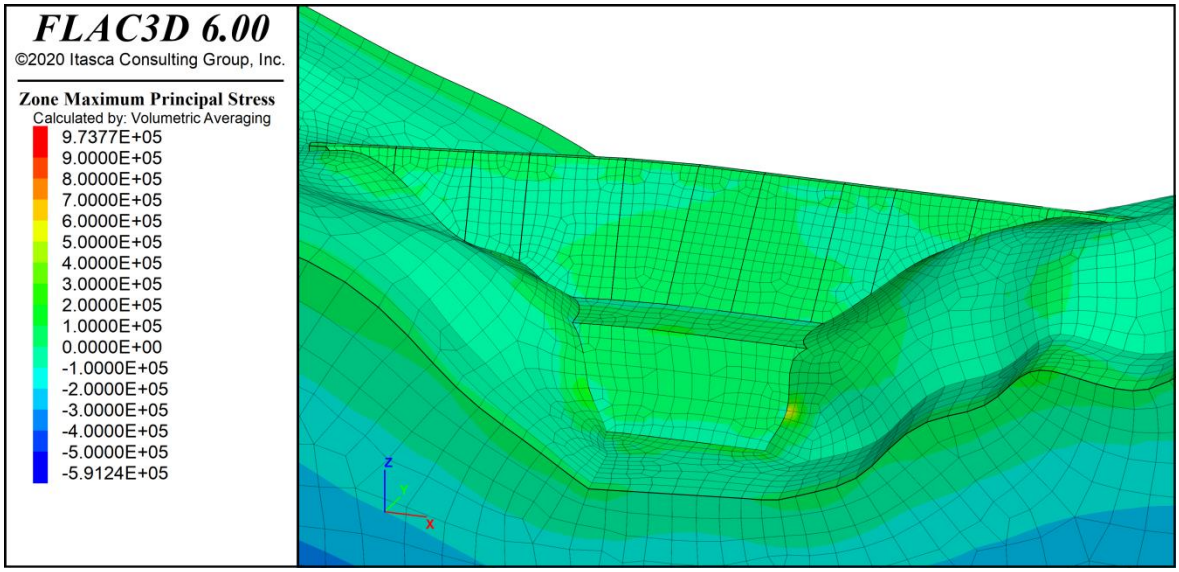


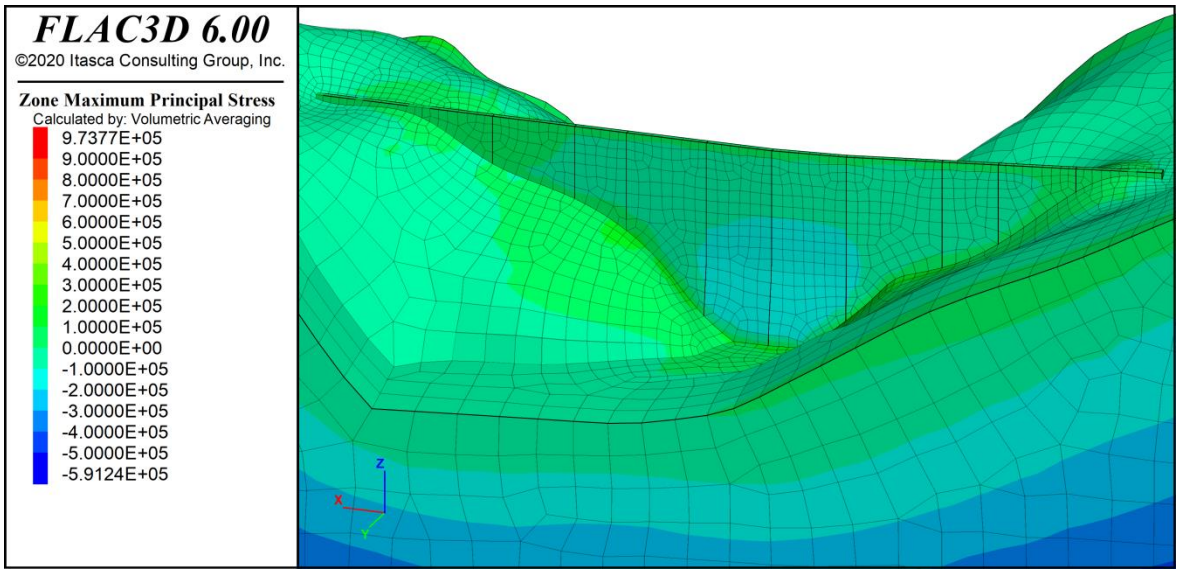
Máxima compresión cuerpo de presa



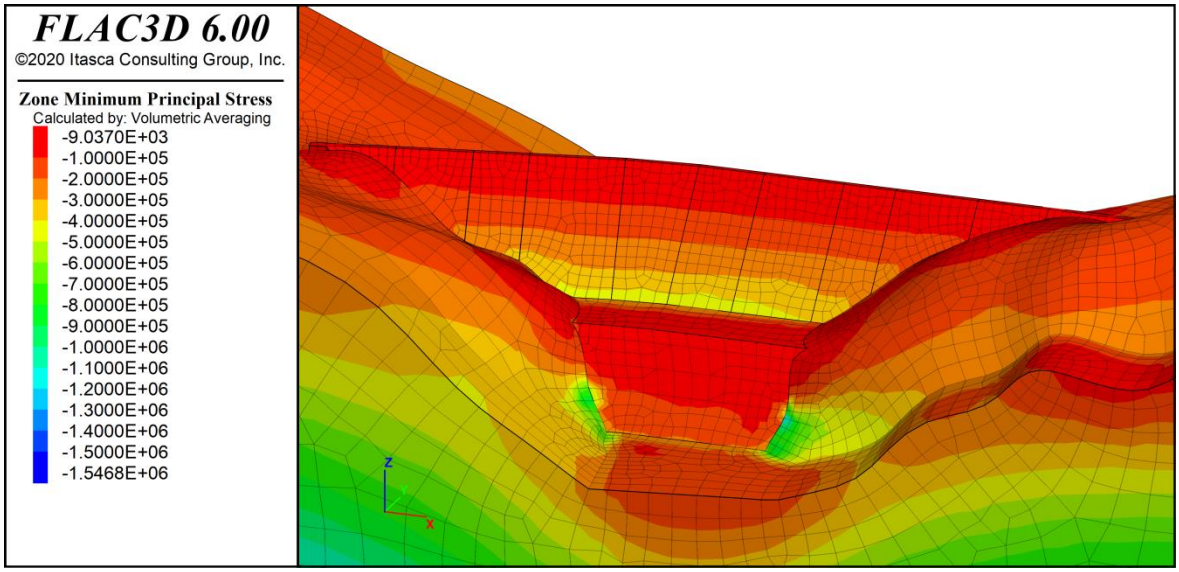


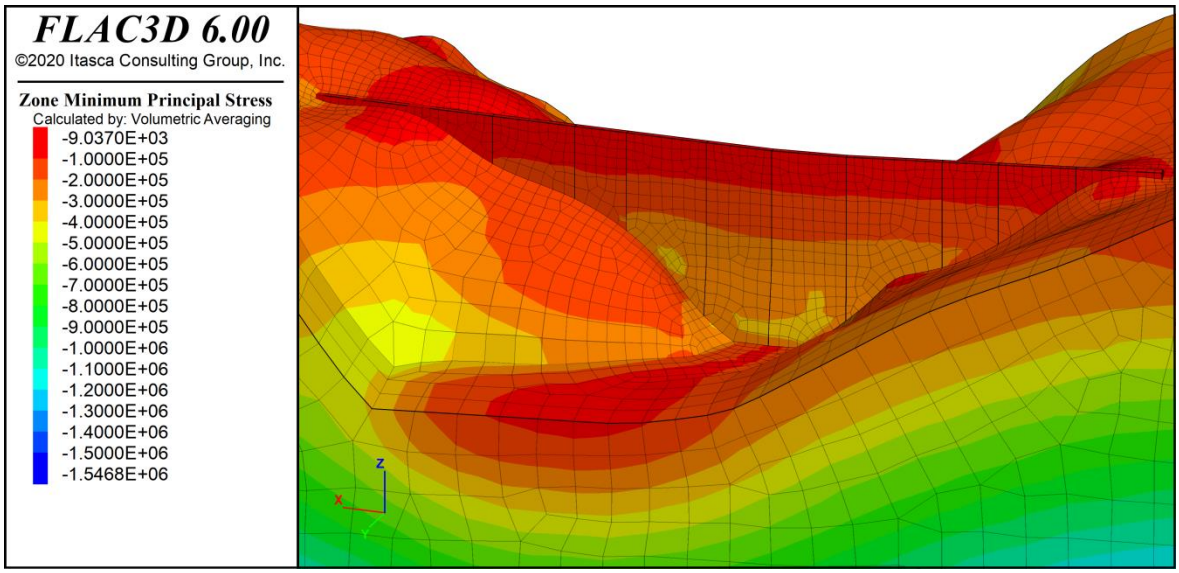
Máxima tracción en cimentación



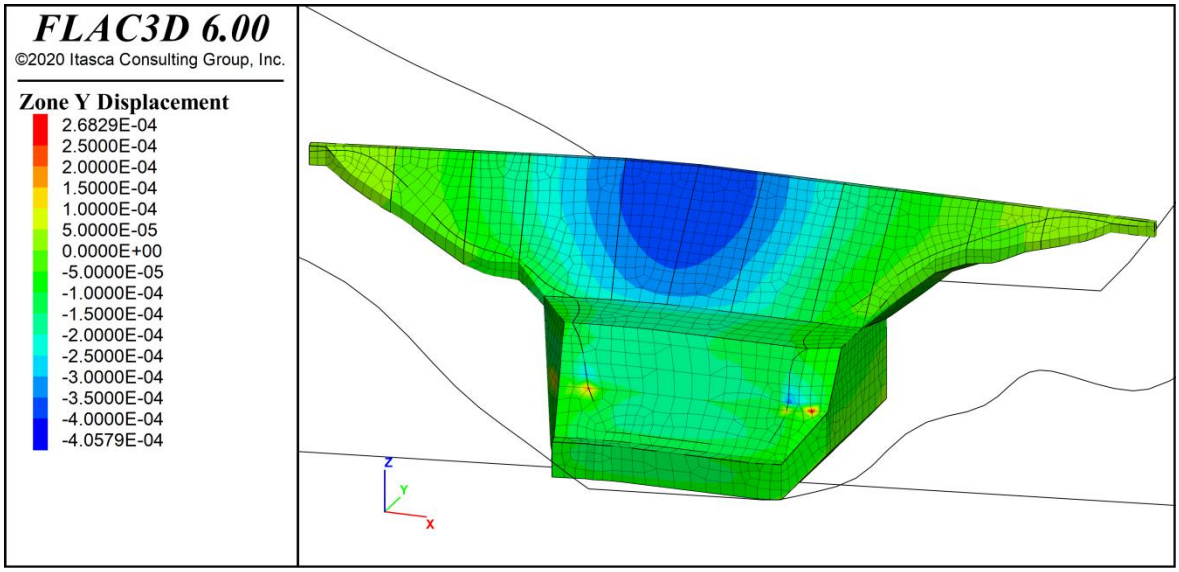


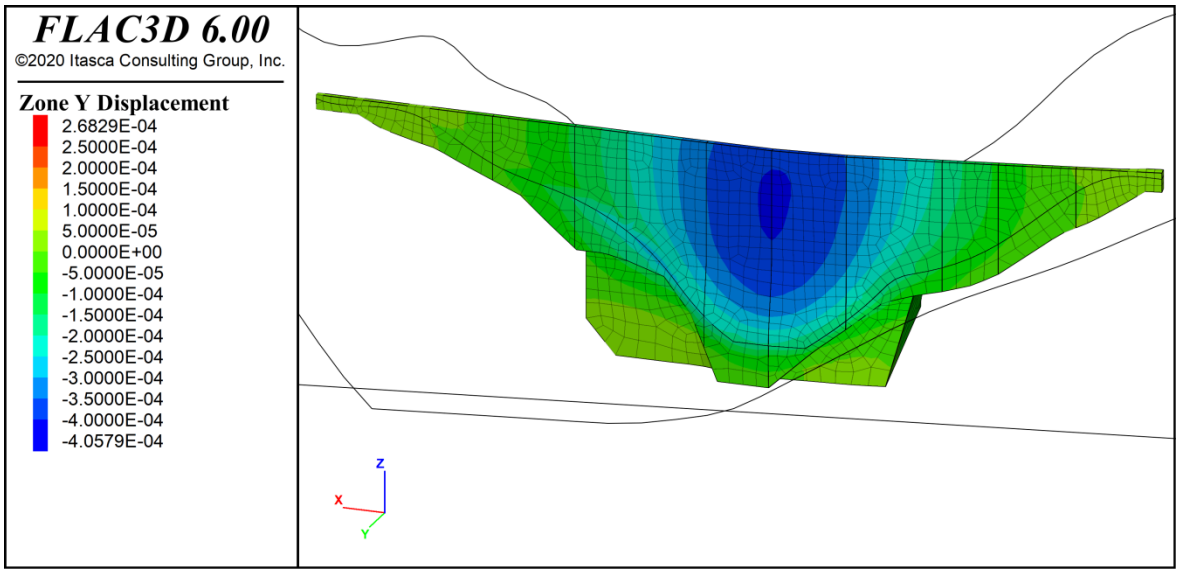
Máxima compresión en cimentación



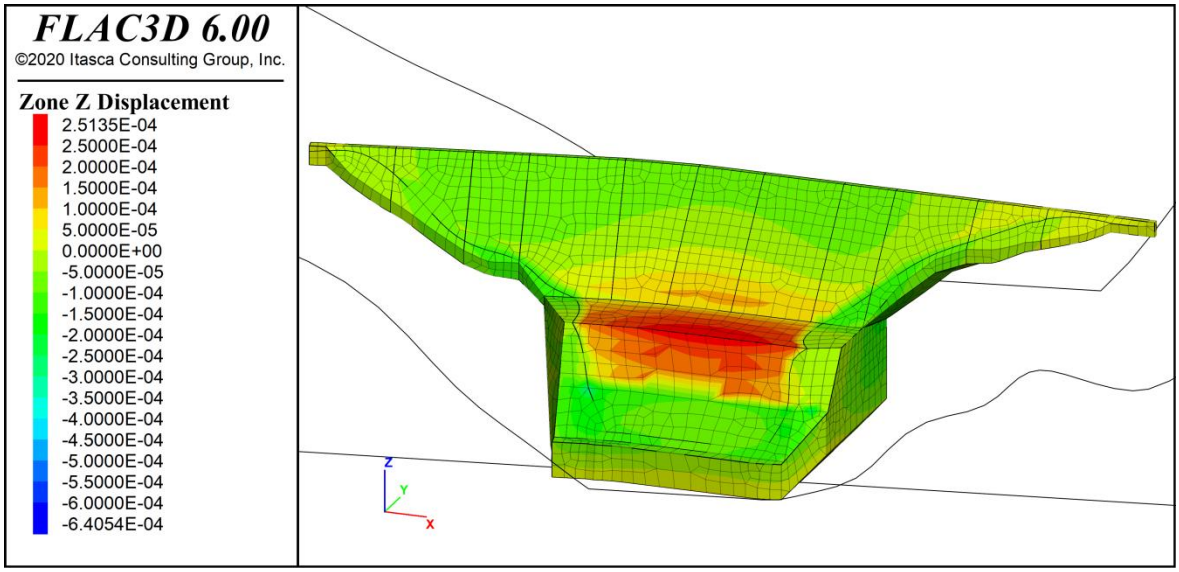


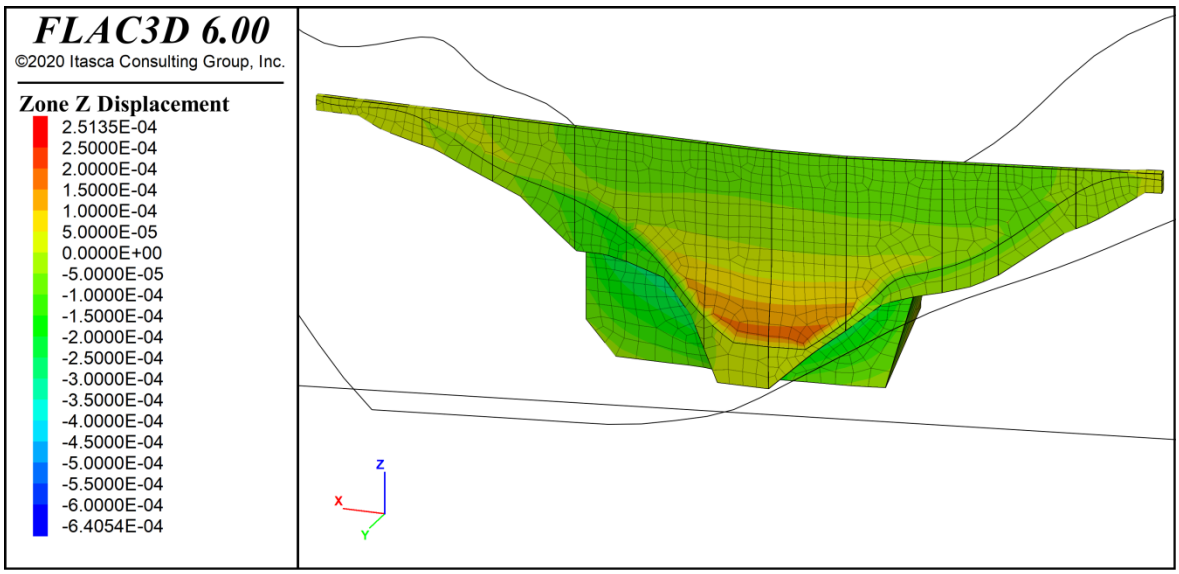
Máximo desplazamiento horizontal en coronación





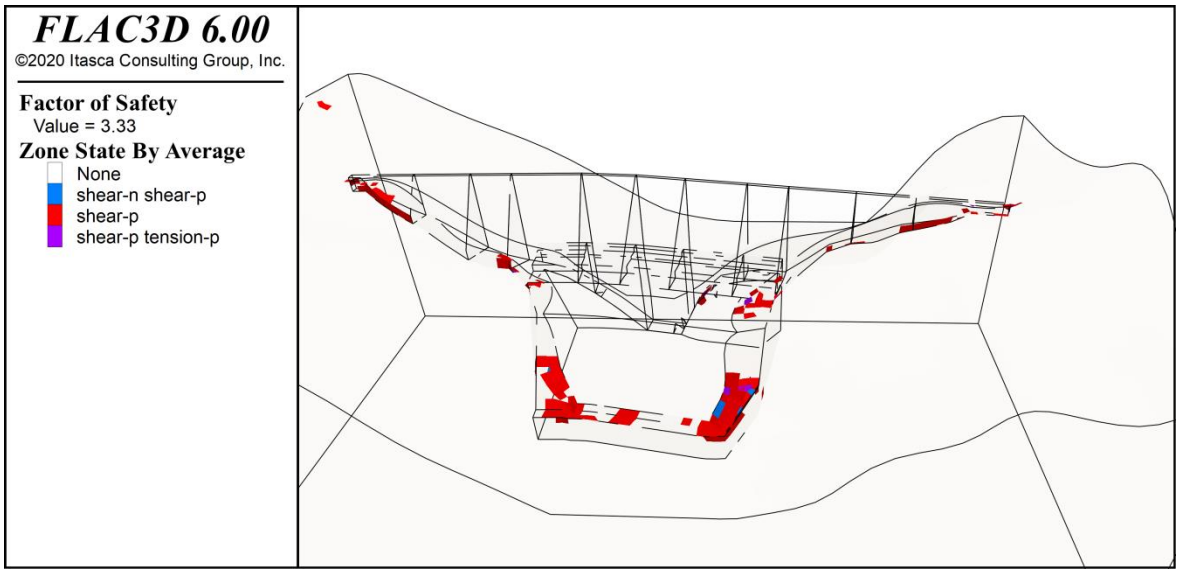
Máximo desplazamiento vertical en coronación



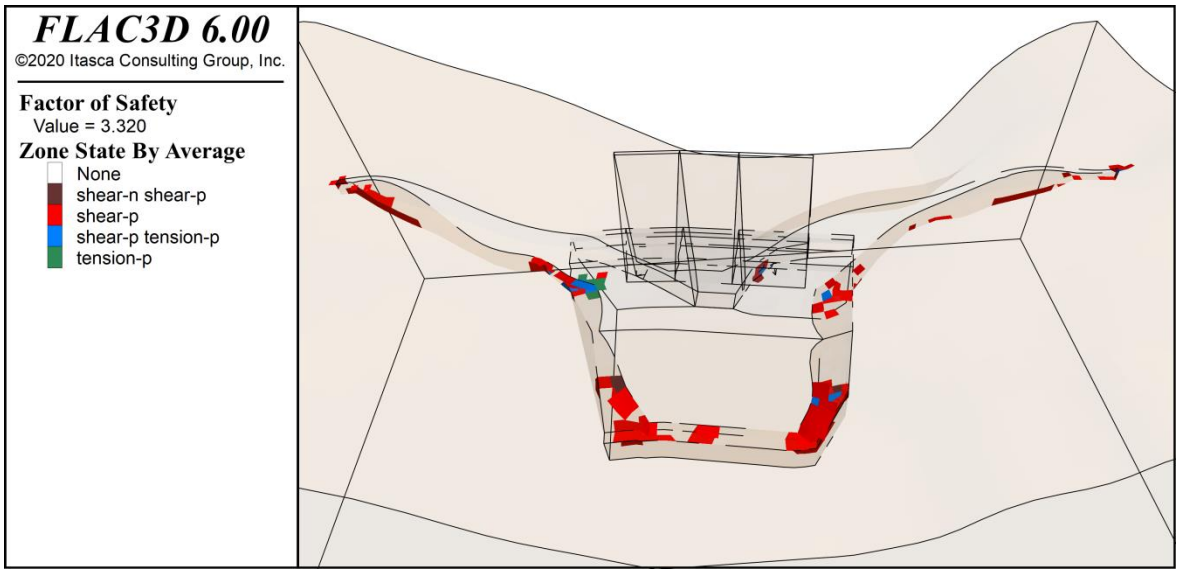


COEFICIENTE DE SEGURIDAD FLAC 3D

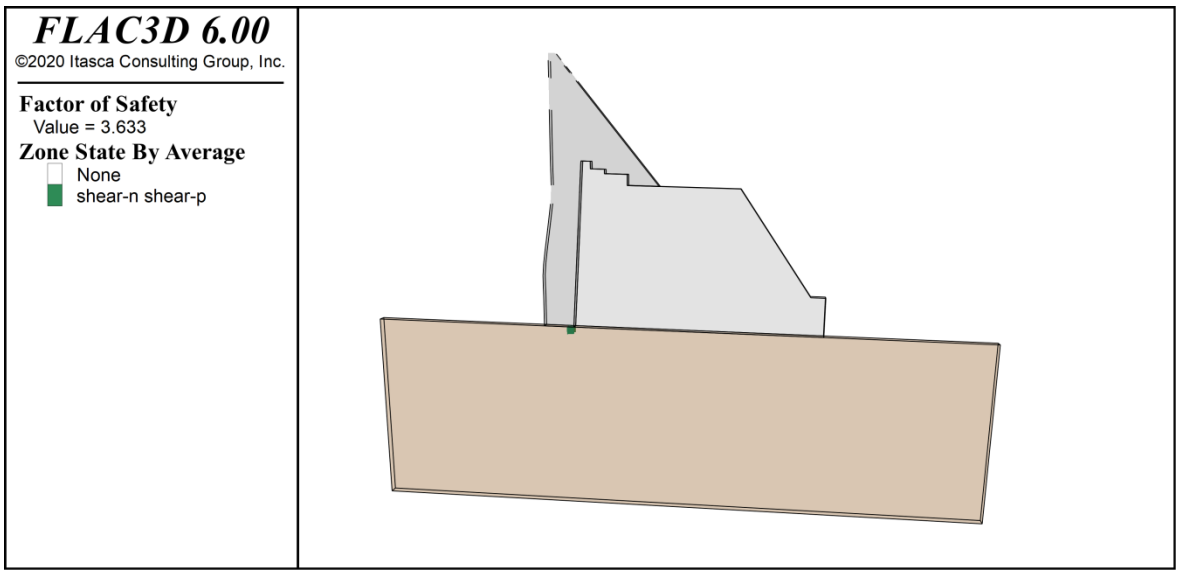
Embalse a cota de coronación+ subpresión – M3D-C



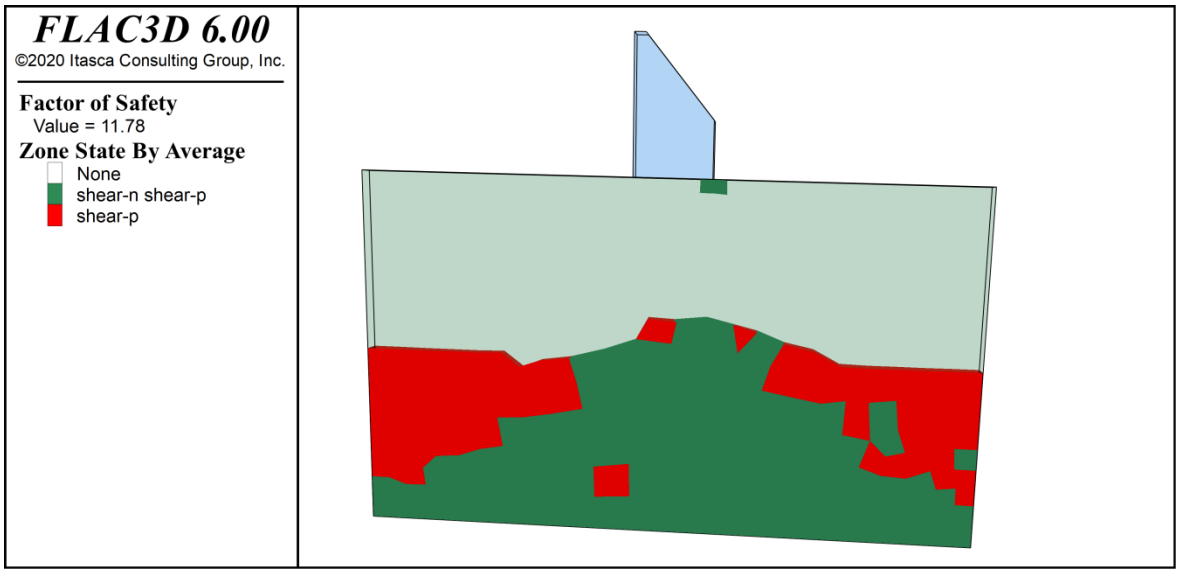
Embalse a cota de coronación + subpresión – M3D-Simp



Embalse a cota de coronación + subpresión – M2D-B



Embalse a cota de coronación + subpresión – M2D-E



EQUILIBRIO LÍMITE

Embalse a cota de coronación + subpresión – M2D-B

DATOS

Características generales

Aceleración de la gravedad	3.81	m/s2
Densidad cuerpo presa	2300	kg/m3
Densidad del agua	1000	kg/m3

Características de la sección

Área	978	m2
xcd	17.15	m2
ycdg	13.35	m2
Longitud base	43	m
Cota coronación	741	m.s.n.m.
Cota aliviadero	740.75	m.s.n.m.
Cota cimentación	701	m.s.n.m.
Cota cauce	705	m.s.n.m.
Cota galería	708	m.s.n.m.
Nivel de embalse	741	m.s.n.m.

Características interfaz

φ	40	°
c	0.4	MPa

Características drenes

CALCULA DREN	0	si = 1
Distancia horizontla dren	1.7	m
Altura galería-cimiento (H3)	17.42033	m.s.n.m.
Altura total (H1)	40	m
Altura cauce (H2)	4	m
K drenes	0.33	

K = 1 -->drenes totalmente ineficaces
K = 0.33 --> drenes eficaces al 67% (máximo valor

FUERZAS ACTUANTES

Peso propio

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)	Excentricidad	Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
		17.15	13.35	4.35	978	2300	2.207E+07	-9.593E+07

Empuje

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)		Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
40	40		13.33333		800	1000	7.848E+06	1.046E+08

Subpresión

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)		Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
4	43	21.5	2	0	172	1000	1.720E+05	0.000E+00
36	43	14.33333		7.166667	774	1000	7.593E+06	5.442E+07
36	0	0		21.5	0	1000	0.000E+00	0.000E+00
22.57967	0	0		21.5	0	1000	0.000E+00	0.000E+00

Resultantes

Sin subpresión y sin sismo	2.207E+07	8.650E+06
Con subpresión y sin sismo	1.447E+07	6.307E+07

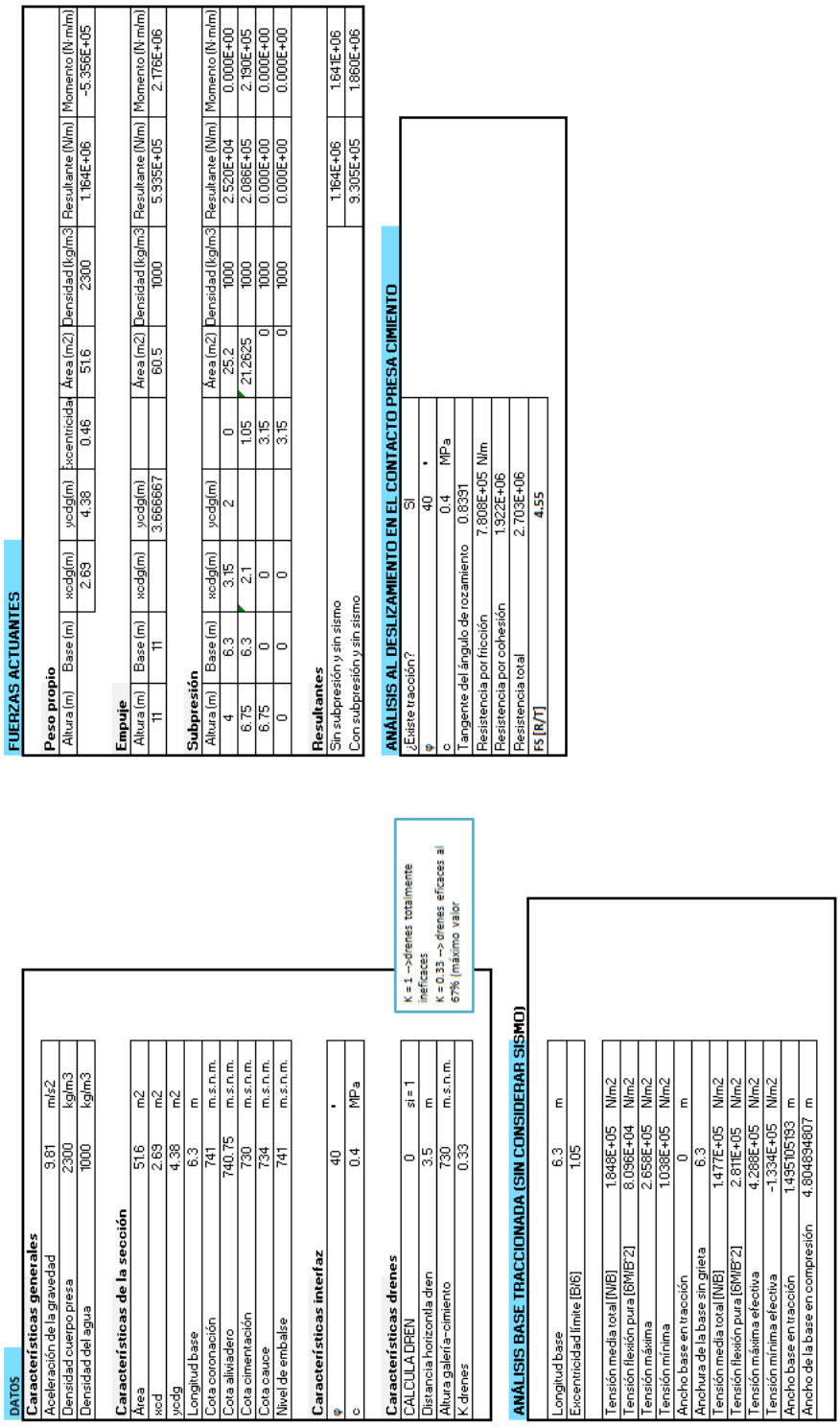
ANÁLISIS AL DESLIZAMIENTO EN EL CONTACTO PRESA CIMIENTO

¿Existe tracción?	NO	
φ	40	°
c	0.4	MPa
Tangente del ángulo de rozamiento	0.8391	
Resistencia por fricción	1.214E+07	N/m
Resistencia por cohesión	1.720E+07	
Resistencia total	2.934E+07	
FS [R/T]	3.74	

ANÁLISIS BASE TRACCIONADA (SIN CONSIDERAR SISMO)

Longitud base	43	m
Excentricidad límite [B/6]	7.166667	
Tensión media total [N/B]	5.132E+05	N/m2
Tensión flexión pura [6M/B^2]	3.115E+05	N/m2
Tensión máxima	8.247E+05	N/m2
Tensión mínima	2.017E+05	N/m2
Ancho base en tracción	0	m
Anchura de la base sin grieta	43	
Tensión media total [N/B]	3.366E+05	N/m2
Tensión flexión pura [6M/B^2]	2.046E+05	N/m2
Tensión máxima efectiva	5.412E+05	N/m2
Tensión mínima efectiva	1.319E+05	N/m2
Ancho base en tracción	0	m
Ancho de la base en compresión	43	m

Embalse a cota de coronación + subpresión – M2D-E



FUERZAS ACTUANTES

Peso propio

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)	Excentricidad	Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
		2.69	4.38	0.46	51.6	2300	1.164E+06	-5.356E+05

Empuje

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)		Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
11	11		3.666667		60.5	1000	5.935E+05	2.176E+06

Subpresión

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)		Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
4	6.3	3.15	2	0	25.2	1000	2.520E+04	0.000E+00
6.75	6.3	2.1		1.05	21.2625	1000	2.086E+05	2.190E+05
6.75	0	0		3.15	0	1000	0.000E+00	0.000E+00
0	0	0		3.15	0	1000	0.000E+00	0.000E+00

Resultantes

Sin subpresión y sin sismo	1.164E+06	1.641E+06
Con subpresión y sin sismo	9.305E+05	1.860E+06

ANÁLISIS AL DESLIZAMIENTO EN EL CONTACTO PRESA CIMIENTO

¿Existe tracción?	SI	
φ	40	°
c	0.4	MPa
Tangente del ángulo de rozamiento	0.8391	
Resistencia por fricción	7.808E+05	N/m
Resistencia por cohesión	1.922E+06	
Resistencia total	2.703E+06	
FS [R/T]	**4.55**	

DATOS

Características generales

Aceleración de la gravedad	9.81	m/s2
Densidad cuerpo presa	2300	kg/m3
Densidad del agua	1000	kg/m3

Características de la sección

Área	516	m2
xcd	2.69	m2
ycdg	4.38	m2
Longitud base	6.3	m
Cota coronación	741	m.s.n.m.
Cota aliviadero	740.75	m.s.n.m.
Cota cimentación	730	m.s.n.m.
Cota cauce	734	m.s.n.m.
Nivel de embalse	741	m.s.n.m.

Características interfaz

φ	40	°
c	0.4	MPa

Características drenes

CALCULA DREN	0	si = 1
Distancia horizontal dren	3.5	m
Altura galería-cimiento	730	m.s.n.m.
K drenes	0.33	

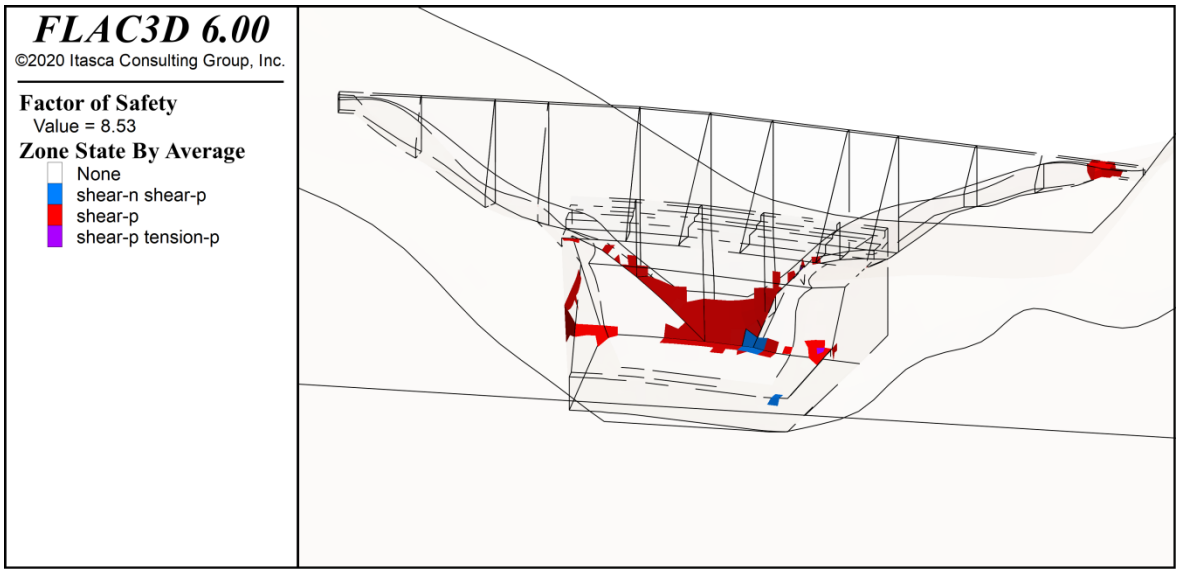
K = 1 -->drenes totalmente ineficaces
K = 0.33 --> drenes eficaces al 67% (máximo valor

ANÁLISIS BASE TRACCIONADA (SIN CONSIDERAR SISMO)

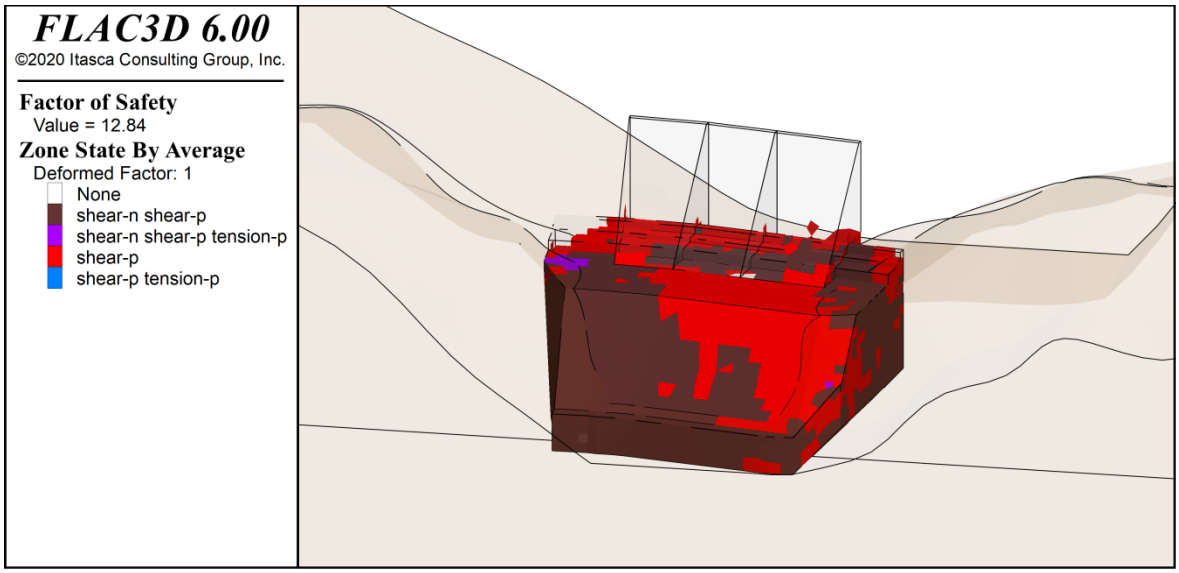
Longitud base	6.3	m
Excentricidad límite [B/6]	1.05	
Tensión media total [NB]	1.848E+05	N/m2
Tensión flexión pura [6M/B^2]	8.096E+04	N/m2
Tensión máxima	2.658E+05	N/m2
Tensión mínima	1.038E+05	N/m2
Ancho base en tracción	0	m
Anchura de la base sin grieta	6.3	
Tensión media total [NB]	1.477E+05	N/m2
Tensión flexión pura [6M/B^2]	2.81E+05	N/m2
Tensión máxima efectiva	4.288E+05	N/m2
Tensión mínima efectiva	-1.334E+05	N/m2
Ancho base en tracción	1.495105193	m
Ancho de la base en compresión	4.804894807	m

ESCENARIO FUTURO. DREN REHABILITADO

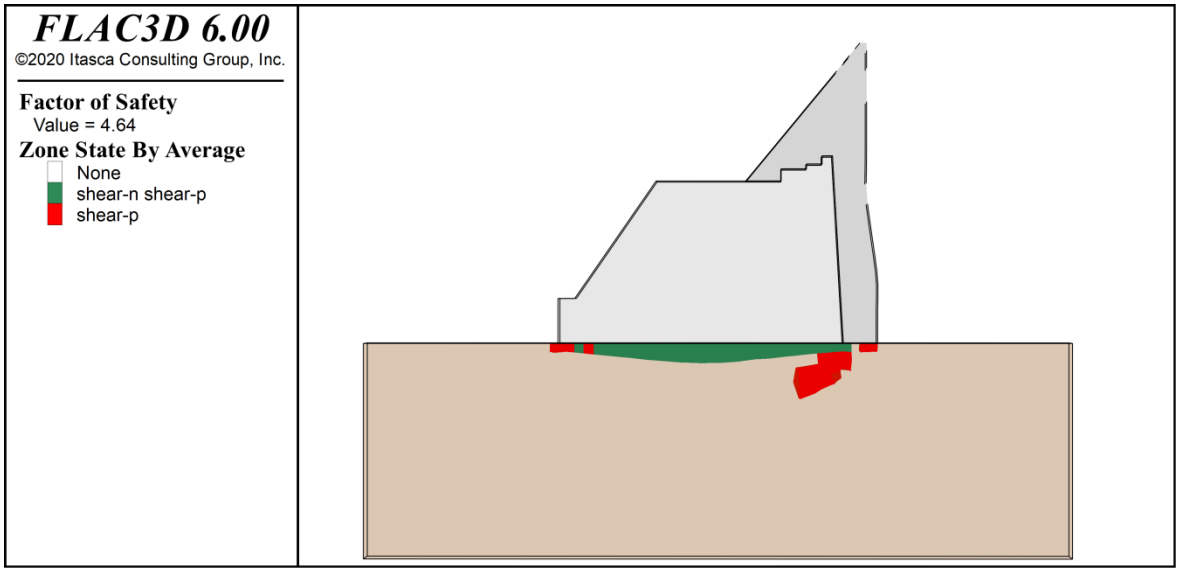
Embalse a cota de coronación+ subpresión – M3D-C



Embalse a cota de coronación + subpresión – M3D-Simp



Embalse a cota de coronación + subpresión – M2D-B



DATOS

Características generales

Aceleración de la gravedad	9.81	m/s2
Densidad cuerpo presa	2300	kg/m3
Densidad del agua	1000	kg/m3

Características de la sección

Área	978	m2
xcd	17.15	m2
ycdg	13.35	m2
Longitud base	43	m
Cota coronación	741	m.s.n.m.
Cota aliviadero	740.75	m.s.n.m.
Cota cimentación	701	m.s.n.m.
Cota cauce	705	m.s.n.m.
Cota galería	708	m.s.n.m.
Nivel de embalse	741	m.s.n.m.

Características interfaz

φ	40	°
c	0.4	MPa

Características drenes

CALCULA DREN	1	si = 1
Distancia horizontla dren	1.7	m
Altura galería-cimiento (H3)	17.42033	m.s.n.m.
Altura total (H1)	40	m
Altura cauce (H2)	4	m
K drenes	0.33	

K = 1 -->drenes totalmente ineficaces
K = 0.33 --> drenes eficaces al 67% (máximo valor

ANÁLISIS BASE TRACCIONADA (SIN CONSIDERAR SISMO)

Longitud base	43	m
Excentricidad límite [B/6]	7.166667	
Tensión media total [N/B]	5.132E+05	N/m2
Tensión flexión pura [6M/B^2]	3.115E+05	N/m2
Tensión máxima	8.247E+05	N/m2
Tensión mínima	2.017E+05	N/m2
Ancho base en tracción	0	m
Anchura de la base sin grieta	43	
Tensión media total [N/B]	4.500E+05	N/m2
Tensión flexión pura [6M/B^2]	1.241E+05	N/m2
Tensión máxima efectiva	5.740E+05	N/m2
Tensión mínima efectiva	3.259E+05	N/m2
Ancho base en tracción	0	m
Ancho de la base en compresión	43	m

FUERZAS ACTUANTES

Peso propio

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)	Excentricidad	Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
		17.15	13.35	4.35	978	2300	2.207E+07	-9.599E+07

Empuje

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)		Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
40	40		13.33333		800	1000	7.848E+06	1.046E+08

Subpresión

Altura (m)	Base (m)	xcdg(m)	ycdg(m)		Área (m2)	Densidad (kg/m3)	Resultante (N/m)	Momento (N·m/m)
4	43	21.5	2	0	172	1000	1.720E+05	0.000E+00
13.42033	41.3	13.76667		7.733333	277.1297	1000	2.719E+06	2.102E+07
13.42033	1.7	0.85		20.65	22.81455	1000	2.238E+05	4.622E+06
22.57967	1.7	0.566667		20.93333	19.19272	1000	1.883E+05	3.941E+06

Resultantes

Sin subpresión y sin sismo	2.207E+07	8.650E+06
Con subpresión y sin sismo	1.935E+07	3.824E+07

ANÁLISIS AL DESLIZAMIENTO EN EL CONTACTO PRESA CIMIENTO

¿Existe tracción?	NO	
φ	40	°
c	0.4	MPa
Tangente del ángulo de rozamiento	0.8391	
Resistencia por fricción	1.623E+07	N/m
Resistencia por cohesión	1.720E+07	
Resistencia total	3.343E+07	
FS [R/T]	**4.26**	

Anejo 4.
MANUAL DE LOS MODELOS

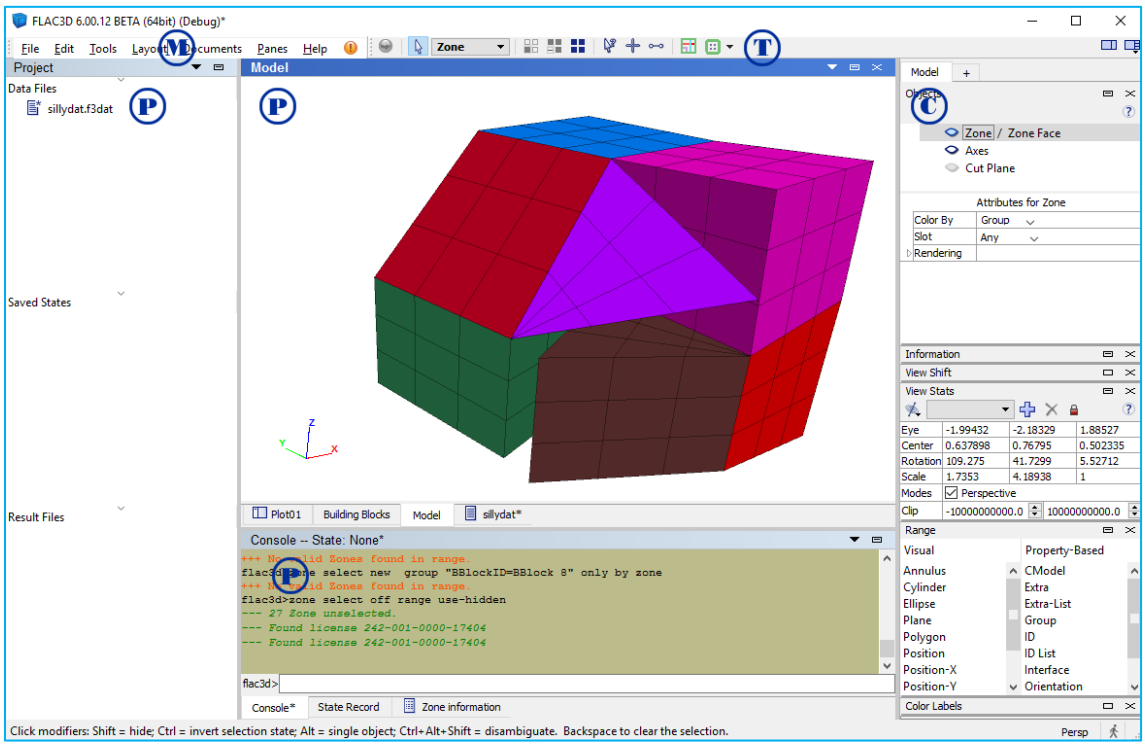
A1. Interfaz de FLAC3D 165

A1.1. Archivos 166

A1.2. Modelo Presa de El Mulato 169

A1.**Interfaz de FLAC3D**

La interfaz de FLAC3D se centra fundamentalmente en la interacción de espacios de trabajo, llamados "paneles" (P en la imagen de abajo), y las herramientas provistas por el Panel de Control (C en la parte inferior) y la barra de herramientas (T en la siguiente) para trabajar ellos.



A continuación, se detalla cada uno de ellos:

P - paneles

FLAC3D tiene un diseño basado en paneles. Un panel es una ventana con una barra de título y controles para manejarlo. Hay varios tipos de paneles en FLAC3D. Cada tipo de panel proporciona una funcionalidad distinta (de ahí los diferentes tipos). En la imagen de arriba, el panel Proyecto (a la izquierda, para gestión de proyecto / archivo), el panel Modelo (centro superior, para la selección de objeto modelo y la nota de agrupación, la barra de título azul más oscura indica que es el panel activo) y la Consola panel (parte inferior central, para emitir comandos) son visibles.

Los paneles de cualquier tipo y de tipo mixto se pueden apilar uno encima del otro, en cuyo caso aparecen como conjuntos con pestañas. Pueden flotar y atracar, lo que significa que la disposición de los paneles en el programa es completamente flexible.

C y T - Panel de control (C) y barra de herramientas (T)

El Panel de control proporciona juegos de herramientas en caja (conocidos como "conjuntos de control") de funciones que son específicas del panel activo actualmente. Puede estar oculto, pero cuando se muestra / visible, siempre se representa en el lado derecho de la ventana del programa. El ítem marcado como "T" es la barra de herramientas. La barra de herramientas, al igual que el Panel de control, es contextual para el panel activo actualmente. Las herramientas que aparecen en él se usan en ese panel y cambiarán cuando se seleccione un tipo de panel diferente.

M - menú principal

A diferencia del Panel de control y la barra de herramientas, el menú principal proporciona opciones fijas, independientemente del tipo de panel activo actualmente. Estos se centran principalmente en las operaciones de administración de archivos, la edición y la administración de paneles, además de proporcionar un menú de Ayuda para el soporte del usuario.

Un aspecto necesario para aprender a trabajar con FLAC3D es comprender los elementos que componen un modelo FLAC3D, los comandos necesarios para trabajar con ellos y las funciones FISH asociadas a ellos.

Aunque no todos los comandos tienen una interfaz de usuario equivalente, existe una superposición significativa entre el conjunto de comandos escritos y las acciones que se pueden realizar en la interfaz de usuario. Y tenga en cuenta que cualquier acción de programa de la interfaz de usuario que modifique el estado del modelo actual se traduce en un comando y se almacena en el registro de estado.

En varios casos, el enfoque de la interfaz de usuario será más fácil y más rápido que la emisión explícita de comandos en el símbolo del sistema o en el archivo de datos. Sin embargo, para obtener la ventaja de la eficiencia que brinda la interfaz de usuario en esas áreas, es necesario comprender los comandos subyacentes y comprender cómo emitirlos a través de las herramientas en la interfaz de usuario.

A1.1.Archivos

Hay varios tipos de archivos que FLAC3D utiliza o crea. Los archivos generalmente se distinguen por sus extensiones. Los más comunes se describen a continuación. Las relaciones entre los archivos principales de un proyecto FLAC3D se describen a continuación:

Archivo de datos

Los comandos de FLAC3D se pueden emitir "de forma interactiva" en el símbolo del sistema o a través de un archivo de datos. El archivo de datos es un archivo ASCII formateado creado por el usuario, que contiene el conjunto de comandos FLAC3D que representa el problema que se analiza. En general, crear archivos de datos es la forma más eficiente de usar FLAC3D. Los archivos de datos se abren y los comandos dentro de ellos son ejecutados por el programa utilizando el comando de llamada de programa, o mediante el comando de menú Archivo ▸ Abrir elemento ... Aunque los archivos de datos pueden tener cualquier nombre de archivo y cualquier extensión, se recomienda usar una extensión común (por ejemplo, ".F3DAT" para comandos de entrada FLAC3D y ".F3FIS" para declaraciones de función FISH) para distinguir estos archivos de otros tipos de archivos.

Guardar el archivo

Un archivo de guardado es un archivo binario que contiene los valores de todas las variables de estado y las condiciones definidas por el usuario hasta el momento actual de ejecución del programa. La razón principal para crear archivos guardados es permitir que uno investigue el efecto de las variaciones de parámetros sin tener que volver a ejecutar un problema por completo. Se puede restaurar un archivo guardado y el análisis continuará en un momento posterior (consulte el comando de restauración del modelo). Normalmente, es una buena práctica crear varios archivos de guardado durante una ejecución de FLAC3D. Los archivos guardados se crean con el comando de guardar modelo; si este comando se da sin una palabra clave de nombre de archivo, se proporcionará el nombre predeterminado "FLAC3D.F3DSAV". Otros términos para guardar archivo son archivo SAV, estado guardado o estado guardado.

Archivo de registro

El archivo de registro es un archivo ASCII formateado que captura todo el texto de salida desde el panel de la consola. El archivo de registro es útil para proporcionar un registro de la sesión de trabajo de FLAC3D; también proporciona un documento con fines de garantía de calidad. El archivo se crea / mantiene si el registro del programa de comando está activado. El usuario puede proporcionar un nombre de archivo usando el comando program log-file; si el comando no está dado pero el registro está activado, se usará el nombre de archivo predeterminado "FLAC3D.LOG".

Archivo de historia

Un archivo de historial es un archivo ASCII formateado creado a petición del usuario al emitir el comando de exportación de historial de comandos. El usuario puede especificar un nombre para el archivo usando la palabra clave de archivo del comando; si no, se usa el nombre predeterminado "FLAC3D.HIS". Los comandos para crear archivos de historial se pueden emitir de forma interactiva o dentro de archivos de datos. Se graba un registro de los valores del historial en el archivo, que se puede examinar utilizando cualquier editor de texto que pueda acceder a los archivos ASCII formateados. Alternativamente, el archivo puede ser procesado por un paquete de gráficos comerciales u hojas de cálculo.

Archivo de tabla

Un archivo de tabla es un archivo ASCII formateado creado al exportar una tabla utilizando el comando de exportación de tabla. Esta tabla puede ser modificada por el usuario e importada a otro estado modelo usando el comando de importación de tabla. El formato de archivo de tabla es simple y fácil de crear a partir de hojas de cálculo u otros datos ASCII. Especifica una secuencia única de pares de valores (x, y), ya sea a intervalos regulares o irregulares.

Archivo de entrada / salida de FISH

Una función FISH escrita por el usuario puede crear, escribir y leer archivos (consulte la sección Funciones de FISH para la entrada / salida de archivos) de dos formularios. Si se selecciona la forma binaria, la representación binaria exacta de una variable FISH se almacena en el archivo. Si se selecciona el formulario ASCII, se pueden escribir o leer datos numéricos o de caracteres de un archivo. La última forma es una forma útil de procesar datos ASCII de forma no estándar en el archivo.

Archivo de proyecto

El archivo de proyecto representa todos los archivos y elementos de la interfaz de usuario involucrados en un proyecto FLAC3D dado, que puede involucrar muchos modelos específicos diferentes y estados modelo. Los datos en un archivo de proyecto están separados del estado del modelo y no se ven afectados por un modelo nuevo o modelo de restauración. El archivo de proyecto almacena el diseño de la interfaz de usuario, los archivos de trazado, los archivos de datos que se editan y la lista de datos y los archivos guardados que se han utilizado o creado para el proyecto.

Archivo de resultados

Un archivo de resultados es una versión más pequeña de un archivo guardado (ver arriba) que contiene solo información específica del usuario sobre el modelo. Como son mucho más pequeños (generalmente alrededor del 5% del tamaño de un archivo guardado), muchos más se pueden crear sin un uso indebido de almacenamiento. Se puede importar un archivo de resultados, sobrescribiendo el estado del modelo actual, de modo que los contenidos se puedan visualizar. Los archivos de resultados pueden salir automáticamente a intervalos especificados por el usuario durante el cálculo.

Archivo de geometría

Un archivo de geometría es un conjunto de nodos, bordes o polígonos en el espacio. A veces esto se conoce como datos CAD. Esta información podría haberse originado a partir de otras fuentes, o podría haber sido generada por FLAC3D. FLAC3D actualmente reconoce tres formaciones de archivos de geometría: DXF, STL o GEOM. Los dos primeros son estándares de la industria; el último es un formato específico de Itasca que preserva los metadatos de los objetos (asignación de variables extra FISH y / o asignaciones de grupos).

Archivo de malla

Un archivo de malla es un formato de archivo que especifica una discretización de espacio en puntos de malla y zonas (o nodos y elementos si se usa el lenguaje típico de elementos finitos). FLAC3D define su propia formación de malla, F3GRID. FLAC3D también puede importar directamente formatos ANSYS (.LIS) y ABAQUS (.INP).

Archivo de datos de usuario

FLAC3D actualmente admite tres tipos de tipos de datos definidos por el usuario. Campos escalares, campos vectoriales y campos tensores. Estos tipos de datos soportan tanto la exportación como la importación en la formación de archivos ASCII personalizados, a través de los comandos de exportación escalar de datos o importación de datos (por ejemplo). Estos se usan principalmente para registrar datos de modelos posibles o para compararlos con datos generados fuera de FLAC3D (como eventos sísmicos importados como datos escalares).

Archivo de paquete

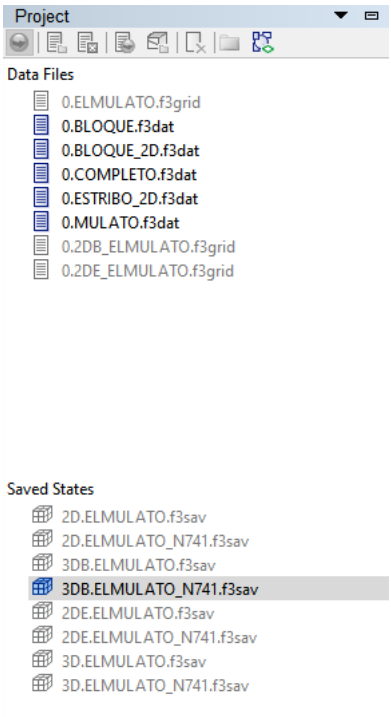
Un archivo de paquete se genera a partir de un proyecto y representa todos los archivos necesarios para recrear el proyecto y los estados del modelo combinados en un solo archivo. Se incluye el archivo del proyecto, todos los archivos de datos y el registro desglosado de todos los estados guardados del modelo. Esta es una forma sencilla de archivar su proyecto FLAC3D para el futuro y también es una opción muy conveniente para Itasca cuando se formulan preguntas de soporte: el envío de un archivo de paquete garantiza que tengamos todo lo que necesitamos para duplicar su problema.

Proyectos FLAC3D presentados

El proyecto FLAC3D es un archivo (*.f3dprj) que se encuentra en el corazón de cualquier proyecto. Proporciona el mecanismo principal para mantener un proyecto en buen estado, que puede estar compuesto por muchos archivos de datos, archivos FISH y archivos guardados.

A1.2.Modelo Presa de El Mulato

Cuando se carga el modelo de la presa de El Mulato, el panel de proyecto se muestra como sigue:



En cuanto a los archivos de datos aparecen:

- 0.MULATO.f3dat : Es el archivo maestro del proyecto, en el que se configuran las distintas opciones de análisis.
- 0.BLOQUE.f3dat : Es el archivo que define las condiciones de contorno, las zonas y las acciones para el modelo de la zona central de valle (M3D-Simp).
- 0.BLOQUE_2D.f3dat : Es el archivo que define variables geométricas empleadas para la definición de la geometría, las condiciones de contorno, las zonas y las acciones para el modelo bidimensional de la sección central de la presa (M2D-C).
- 0.COMPLETO.f3dat : Es el archivo que define las condiciones de contorno, las zonas y las acciones para el modelo tridimensional completo (M3D-Simp).
- 0.ESTRIBO_2D.f3dat : Es el archivo que define variables geométricas empleadas para la definición de la geometría, las condiciones de contorno, las zonas y las acciones para el modelo bidimensional de la sección del estribo (M2D-E).
- 0.ELMULATO.f3grid : Este archivo contiene la definición geométrica de la malla a emplear en los modelos 3D.

Al abrir el archivo maestro del proyecto se puede ver:

```
;=============================================================================================
;                                    AYAGAURES
;=============================================================================================

model new
model configure thermal
model configure
model gravity 9.81

;=================================================================
;;          DEFINICION DE LAS PROPIEDADES FISICAS
;=================================================================

fish define props_fisicas
;-----------------------------------------------------------------
;                        VARIABLES DE DECISION
;-----------------------------------------------------------------
    MODELO = '2D' ; 2D/3D
    termico = 'no' ; si/no
    termico_embalse = 'no' ; si/no
    con_terreno = 'si' ; si/no
    mecanico = 'si' ; si/no


    geometria3D = 'PRESA' ;PRESA/BLOQUE/COMPLETO
    geometria2D = 'ESTRIBO' ; BLOQUE/ESTRIBO
```

Estas opciones definen:

- si se emplea una geometría 2d p 3d
- si se realiza un análisis térmico o no (si no se realiza un cálculo térmico, por defecto, se realiza un cálculo mecánico).
- si se realiza un cálculo térmico con embalse o no.
- si se realiza un cálculo térmico con terreno o no.
- el modelo a emplear en la geometría 3D.
- el modelo a emplear en la geometría 2D.

Para realizar cambios en el modelo, únicamente es necesario realizar algún cambio en estas opciones, guardar el archivo y volver a llamarlo con el comando “Call”.

También se definen las propiedades de los materiales y la interfaz tal y como se muestra en la siguiente imagen:

```
;------------Caracteisticas de la presa--------------------
 ;_____________________Material hormigon en masa_____________________________
mod_young_h = 22.00e9 ;Pa
mod_poisson_h = 0.20
densidad_h = 2300 ; t/m3
roz_h = 53.0; grados
cohesion_h = 3.0e6 ; Pa
tension_h =  2.0e6 ; Pa - limite de traccion
 ;_____________________Material mamposteria basaltica_____________________________
mod_young_m = 12.70e9 ;Pa
mod_poisson_m = 0.33
densidad_m = 2300 ; t/m3
roz_m = 55.0; grados
cohesion_m = 1.40e6 ; Pa
tension_m =  0.64e6 ; Pa - limite de traccion

 ;------------Caracteisticas del terreno --------------------
 ;_____________________Material Ignimbritas_____________________________

mod_young_t = 18.5e9 ;Pa
mod_poisson_t = 0.28
densidad_t= 2300 ; t/m3
roz_t = 45 ; grados
cohesion_t = 1.0e6 ; Pa
tension_t =  2.7e6 ; Pa - limite de traccion


 ;------------Caracteisticas de la interfaz --------------------

 ;_____________Interfaz presa-terreno_____________________________

roz_interpt = 40 ; grados
cohesion_interpt = 0.4e6 ; Pa
tension_interpt =  0.38e6 ; Pa - limite de traccion

 ;_____________Interfaz bloques_____________________________

roz_interb = 49 ; grados
cohesion_interb = 0.50e6 ; Pa
tension_interb =  0.80e6 ; Pa - limite de traccion
```