

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL

“Evaluación de los materiales del relleno de la presa palo redondo en el comportamiento de la filtración”

Área de Investigación:

Hidráulica

Autor:

Br. Cabrera Carlos, Jhon Jhonatan

Jurado Evaluador:

Presidente: Cabanillas Quiroz, Guillermo Juan

Secretario: Geldres Sánchez, Carmen Lucía

Vocal: Gálvez Paredes, José Alcides

Asesor:

Serrano Hernández, José Luis

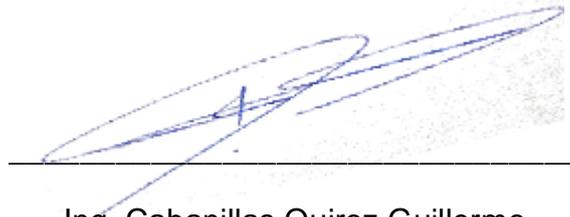
Código Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1931-6817>

TRUJILLO – PERÚ

2021

Fecha de sustentación: 2021/10/20

MIEMBROS DEL JURADO



Ing. Cabanillas Quiroz Guillermo

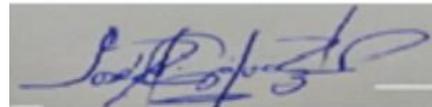
PRESIDENTE



Carmen L. Geldres Sánchez
INGENIERO CIVIL
CIP 80599

Ing. Geldres Sánchez Carmen

SECRETARIO



Ing. Gálvez Paredes José

VOCAL



Ms C Ing José Luis Serrano Hernández.

Ing. Serrano Hernández José Luis

ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres, Nazario y Faustina por su educación, apoyo y confianza de siempre.

A mis hermanos Rubén y Keedy por su confianza y fraternidad.

A mi asesor de tesis Ing. José Serrano Hernández por su apoyo permanente compartiendo sus conocimientos en la presente investigación.

A mis amigos de la Universidad por su confianza y sincera amistad.

Br. Jhon Cabrera

AGRADECIMIENTOS

Mi sincero agradecimiento a mi Asesor Ing. José Serrano Hernández, por el desinteresado apoyo, dedicación permanente y tiempo en el presente trabajo de Investigación.

Al Proyecto Especial Chavimochic por el aporte de información necesaria para la realización del presente trabajo.

Mi agradecimiento y reconocimiento a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por haberme transmitido sus conocimientos, sus logros y consejos para mejorar en lo personal y profesional.

Br. Jhon Cabrera

RESUMEN

Las presas de materiales sueltos son una de las estructuras más importantes y complejas de ingeniería debido a su especialización técnica y costo importante para su construcción, el nivel de seguridad es uno de los requisitos más importantes que deben cumplir las presas, por lo tanto, es ineludible analizar y evaluar las filtraciones que se pueden producir en estas estructuras y su impacto en la estabilidad, pues su mal funcionamiento podría conllevar a desastres con grandes pérdidas humanas, con alto impacto social, económico y ambiental.

La investigación realizada aborda la evaluación de los materiales de relleno de la Presa Palo Redondo en el comportamiento de la filtración, para ello se analiza mediante el escenario de Presa Llena en operación, desembalse y llenado rápido y operación de la Presa durante un año. A efecto de verificar la seguridad de la Presa se analiza la estabilidad de talud en los escenarios de Presa construida, en operación, llenado y desembalse rápido. Se utiliza el programa computacional especializado en geotecnia MIDAS GTS NX en la cual se ingresa la geometría y las propiedades de los materiales constructivos y de cimentación de la presa para obtener los resultados de las filtraciones y esfuerzos a través de los factores de seguridad de la presa en los escenarios evaluados. Los resultados de filtración y estabilidad son adecuados para la seguridad de la Presa Palo Redondo.

En el Capítulo I se presenta el problema de investigación, los objetivos y la justificación del estudio, en el Capítulo II se presenta el marco teórico a través de la revisión de estudios realizados respecto a filtraciones y estabilidad de presas de tierra, en el Capítulo se presenta la información de ingeniería de la Presa Palo Redondo, en el Capítulo IV se señala la metodología utilizada en la investigación, en el Capítulo V se presenta los resultados del análisis de filtración y estabilidad, en el Capítulo VI se discute los resultados obtenidos respecto a investigaciones similares. Finalmente se presenta las conclusiones y recomendaciones arribadas en la investigación.

Palabras claves: Filtración, Estabilidad, Factor de seguridad

ABSTRACT

Loose material dams are one of the most important and complex engineering structures due to their technical specialization and important cost for their construction, the level of safety is one of the most important requirements that dams must meet, therefore, it is essential to analyze and evaluate the leaks that can occur in these structures and their impact on stability, since their malfunction could lead to disasters with great human losses, with high social, economic and environmental impact.

The research carried out addresses the evaluation of the filling materials of the Palo Redondo Dam in the behavior of the filtration, for this it is analyzed through the scenario of Full Dam in operation, discharge and rapid filling and operation of the Dam for one year. In order to verify the safety of the Dam, the slope stability is analyzed in the scenarios of Dam built, in operation, filling and rapid discharge. The computer program specialized in geotechnics MIDAS GTS NX is used in which the geometry and properties of the construction and foundation materials of the dam are entered to obtain the results of the leaks and efforts through the safety factors of the dam. in the evaluated scenarios. The filtration and stability results are appropriate for the safety of the Palo Redondo Dam.

In Chapter I presents the research problem, the objectives and the justification of the study, in Chapter II the theoretical framework is presented through the review of studies carried out regarding seepage and stability of earth dams, in the Chapter it is presented The engineering information of the Palo Redondo Dam, in Chapter IV the methodology used in the investigation is indicated, in Chapter V the results of the filtration and stability analysis are presented, in Chapter VI discusses the results obtained with respect to similar investigations. Finally, the conclusions and recommendations arrived at in the investigation are presented.

Keywords: Filtration, Stability, Safety factor

PRESENTACIÓN

Señores miembros del jurado

En cumplimiento del reglamento de Grados y Títulos de la escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Privada Antenor Orrego sede Trujillo, es grato poner a vuestra consideración, el presente trabajo de investigación titulado: **“EVALUACIÓN DE LOS MATERIALES DEL RELLENO DE LA PRESA PALO REDONDO EN EL COMPORTAMIENTO DE LA FILTRACIÓN”**, con la finalidad de cumplir los requisitos para optar el **TÍTULO PROFESIONAL de INGENIERO CIVIL**.

La construcción de la presa Palo Redondo corresponde a las obras en ejecución más expectante para la región La Libertad, principalmente por los beneficios proyectados que se obtendrá a través de la operación de la presa en el afianzamiento hídrico en la zona costera de La Libertad; sin embargo, luego de iniciado su construcción se paralizó por motivos contractuales y a la fecha son cerca de 5 años de obra paralizada. No siendo objeto evaluar la situación que conllevó a la paralización, se considera importante analizar y evaluar los materiales utilizados en el relleno de la presa en el comportamiento de la filtración, pues conocemos que, siendo las construcciones de las presas obras de ingeniería de alta complejidad, es necesario garantizar su estanqueidad y estabilidad que puede ser evaluada a través de la filtración del cuerpo de la presa.

En ese sentido, la presente investigación busca evaluar los materiales de la presa Palo Redondo en el comportamiento de la filtración asimismo identificar posibles riesgos de filtración en el cuerpo de presa, y de existir plantear medidas de mitigación.

De acuerdo a lo expuesto, ponemos la presente investigación para que sea evaluado por tan digno jurado.

Trujillo, 20 de octubre de 2021.



Br. Jhon Jhonatan Cabrera Carlos

ÍNDICE

RESUMEN	i
ABSTRACT.....	ii
PRESENTACIÓN	ii
ÍNDICE	iv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
Problema de Investigación	2
Objetivos	3
1.1.1. Objetivo General	3
1.1.2. Objetivos Específicos.....	3
Justificación del estudio.....	3
CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA	5
2.1. Antecedentes del estudio	6
2.2. Marco Teórico	10
Información Presa Palo Redondo	15
2.3. Marco Conceptual.....	19
2.4. Sistema de hipótesis.....	21
CAPÍTULO III. ESTUDIOS DE INGENIERÍA	22
3.1. Parámetros de Diseño de la Presa Palo Redondo.....	23
3.2. Diseño geométrico de la Presa	23
3.3. Materiales del Relleno de la Presa	24
3.4. Fundación y Tratamientos de la Presa	27
3.5. Taludes externos y estabilidad.....	28
3.6. Losa de concreto	29
3.7. Bordillo Extrusado.....	29

3.8. Parapeto.....	29
3.9. Instrumentación	30
3.10. Juntas y Sellos.....	30
3.11. Plinto	31
3.12. Estudios de Filtración de la Presa y Estabilidad	32
3.12.1. Filtración	32
3.12.2. Estabilidad de taludes	34
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA EMPLEADA	37
4.1 Tipo y nivel de investigación	38
4.2 Población y muestra de estudio	38
4.3 Diseño de Investigación	39
4.3.1 Revisión documental.....	39
4.3.2 Revisión de los estudios de la Presa Palo Redondo.....	39
4.3.3 Modelamiento de filtración y estabilidad	39
4.3.4 Discusión de resultados.....	40
4.4 Técnicas e Instrumentos de investigación	40
4.5 Procesamiento y análisis de datos.....	40
4.5.1 Filtración	40
4.5.2 Estabilidad	41
CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	42
5.1. Resultados de Filtración	43
5.1.1. Presa construida llena	43
5.1.2. Llenado y desembalse rápido.....	45
5.1.3. Operación de Presa	48
5.2. Resultados Estabilidad	51
5.2.1. Presa construida sin operación	51

5.2.2. Presa construida en operación.....	52
5.2.3. Llenado y desembalse rápido.....	53
5.3. Análisis e interpretación de resultados	54
5.3.1. Filtraciones	54
5.3.2. Esfuerzos.....	55
CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	57
CONCLUSIONES.....	60
RECOMENDACIONES	62
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXOS.....	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Presa Palo Redondo – Sección Transversal.	16
Figura 2. Sección de la presa - Materiales.....	24
Figura 3. Fajas granulométricas de los materiales de la presa.	25
Figura 4. Clase de permeabilidad adoptadas.....	33
Figura 5. Presión de Poros.....	43
Figura 6. Gradiente Hidráulica (x).	44
Figura 7. Velocidad de Flujo Resultante.	44
Figura 8. Líneas de Flujo de Filtración.	45
Figura 9. Caudal de Filtración por día.	45
Figura 10. Presión de Poros.....	46
Figura 11. Gradiente Hidráulica (x).	46
Figura 12. Velocidad de Flujo Resultante.	47
Figura 13. Líneas de Flujo de Filtración.....	47
Figura 14. Caudal de Filtración Desembalse Rápido.	48
Figura 15. Presión de Poros.....	48
Figura 16. Gradiente Hidráulica (x).	49
Figura 17. Velocidad de Flujo Resultante.	49
Figura 18. Líneas de Flujo de Filtración.....	50
Figura 19. Caudal de Filtración estado transitorio en 1 año.	50
Figura 20. Desplazamiento de la presa.	52
Figura 21. Esfuerzo total de la presa.....	52
Figura 22. Desplazamiento de la presa.	53
Figura 23. Esfuerzo total de la presa.....	53
Figura 24. Desplazamiento de la presa.	54
Figura 25. Esfuerzo total de la presa.....	54

ÍNDICE DE TABLAS

Cuadro N° 1. Materiales del relleno de la Presa.	27
Cuadro N° 2. Materiales del relleno de la Presa.	33
Cuadro N° 3. Valores de los Coeficientes de Permeabilidad del aluvial y concreto.....	34
Cuadro N° 4. Valores de los Coeficientes de Permeabilidad del relleno y concreto.	34
Cuadro N° 5. Factores de seguridad de condiciones de carga.	35
Cuadro N° 6. Valores de las propiedades de los materiales de relleno y cimentación. ...	35
Cuadro N° 7. Valores de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de relleno de presa.	36
Cuadro N° 8. Parámetros Geotécnicos.	41
Cuadro N° 9. Resultados de Análisis de Estabilidad.	51

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Problema de Investigación

a. Descripción de la realidad problemática

Las obras hidráulicas constituyen uno de los sectores muy desarrollados en el sector de la construcción, para lo cual involucra una adecuada gestión e ingeniería resultando ello indispensable para su buen desarrollo y funcionamiento.

En las obras hidráulicas construidas, es importante realizar monitoreos continuos y permanentes con finalidad de realizar el seguimiento del desempeño de la obra, y en particular detectar a tiempo alguna patología, de esta manera implementar planes de control y mejora, caso contrario la estructura se vería comprometida pudiendo llegar a su colapso, y con ello traer grandes consecuencias en daños civiles y económicos.

Las presas de materiales sueltos no están exentas a sufrir patologías debido a que mayormente se utilizan elementos naturales como tierras, gravas, arenas, etc., propio de la zona tal como se encuentra en su naturaleza, por tanto, su mal proceso constructivo puede ocasionar problemas tales como fallas en su estructura de relleno, agrietamiento de las estructuras de concreto, fugas en conducto, erosión interna, falla debido al terreno en la cimentación, problema de estabilidad de taludes, erosión de taludes, etc.

La presa Palo Redondo es una presa de materiales sueltos con cara de concreto (CFRD por sus siglas en inglés), tiene una capacidad de almacenamiento de 401 hm^3 , inició su construcción en noviembre de 2014, en diciembre de 2016 se paraliza la construcción por asuntos contractuales. En marzo de 2017 por el fenómeno de El Niño Costero se ve sometida a un almacenamiento de agua no previsto a una altura de 11m por 5 meses sin que se haya concluido la construcción de la cara de concreto, plinto sección C y las inyecciones de impermeabilización en los estribos y en la pantalla plástica. A septiembre de 2021 la obra sigue paralizada. Sin embargo, no se ha realizado evaluación de las filtraciones que se hayan podido presentar en la presa producto de la inundación antes mencionada.

Dado el contexto antes mencionado, resulta pertinente evaluar los materiales utilizados en la construcción del relleno de la presa en el comportamiento de

la filtración, adicionalmente evaluar si la inundación presentada no generaría riesgos importantes en la oportunidad que inicie la operación de la presa, caso contrario proponer alternativas de mitigación.

b. Formulación del problema

¿Los materiales utilizados en la construcción del relleno de la presa Palo Redondo permiten filtraciones permisibles no conllevando a poner en riesgo la estabilidad de la presa cuando sea puesta en operación?

Objetivos

1.1.1. Objetivo General

Evaluar los materiales usados en la construcción del relleno de la Presa Palo Redondo en el comportamiento de las filtraciones.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Evaluar las características geotécnicas de los materiales de relleno de presa.
- Efectuar el análisis de las filtraciones en el cuerpo de la presa, a través de simulación numérica.
- Identificar posibles riesgos por las filtraciones en el cuerpo de la presa.
- Proponer alternativas mitigación de riesgos de las filtraciones en el cuerpo de la presa en caso lo amerite.

Justificación del estudio

El estudio se justifica a nivel teórico a través de la aplicación de la teoría de estabilidad de masas, filtración de agua en medios porosos.

Así también esta investigación se justifica a nivel metodológico al utilizar los instrumentos de datos de pruebas de campo sobre la permeabilidad e índices de vacíos, y la técnica de recolección de datos, posibilitando de esta utilizar la información para efectuar la simulación de filtración en el programa computacional MIDAS GTS NX. Para el modelo se calibrará y validará, luego se analizará diversos escenarios sobre la filtración de la presa. El modelo de filtración podrá ser actualizado a la culminación de la ejecución de la Presa,

así como podrá ser replicado en otros proyectos similares siguiendo la metodología planteada en el estudio.

Finalmente, la presente investigación se justifica de manera práctica debido a que validando el buen comportamiento de los materiales en las filtraciones y estabilidad se garantiza la estanqueidad y seguridad de la Presa lo cual incidirá de manera positiva en los beneficios estimados del proyecto.

CAPÍTULO II. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Antecedentes del estudio

En la búsqueda de investigaciones sobre los materiales sueltos en presas tenemos a (Jalil A., Ahmed B. y Mohamed E., 2020) quienes investigaron sobre el la erosión-filtración en la inestabilidad hidráulica de presas en Marruecos y el efecto del calentamiento global. La investigación es explicativa, evaluaron el comportamiento de las presas en épocas de sequía prolongada y como ello influye en la vulnerabilidad de las presas al reducir la resistencia a la erosión interna. Los instrumentos utilizados fueron la revisión documental de diferentes presas en Marruecos para analizar la inestabilidad de las presas de tierra, y las pruebas de erosión-filtración a través de muestras del núcleo del suelo o del filtro de 3 presas. Concluyeron que los materiales sueltos en la construcción de las presas en Marruecos presentan un buen grado de resistencia a la erosión; sin embargo, el paso de la desecación hace que el suelo sea más susceptible a la erosión.

Por otro lado, se tiene las investigaciones de filtraciones en presas de material sueltos de (Yangiev A., Gapparoy F. y Adjimuratov D., 2019) quienes investigaron sobre el proceso de la filtración del cuerpo de la presa de tierra y su efecto químico en los piezómetros. El diseño de investigación es explicativo a través de la evaluación del flujo de filtración en la estructura de la presa y su implicancia en la estabilidad de la presa. Los instrumentos utilizados es la revisión documentaria sobre filtraciones en presas de tierra, el análisis de gradientes de flujo de filtración a través de la presa, así como el análisis de como la composición del agua que puede afectar a los piezómetros. Concluyeron que la filtración de las presas con flujos de agua salinas sulfatadas causa en las estructuras de concreto y metal aceleración de corrosión para lo cual es necesario colocar materiales hidroaislante en dichas estructuras.

En cuanto a diseños de presas, (Guevara, 2018), investigó sobre los criterios que se deben de tener en cuenta en el diseño de un presa de enrocado, así como las experiencias en la construcción de presas de grava con cara de concreto y/o enrocado y/o geomembranas. El diseño de la investigación empleado fue explicativa a través del análisis de los parámetros del diseño de presas, así como las experiencias en la construcción de presas de

enrocado o grava con cara de concreto (CFRD y CFGD). Los instrumentos utilizados en la investigación fueron los diseños de diferentes presas en el mundo tipo CFRD y CFGD, así como informes de la construcción de presas de esa tipología. La investigación concluyó con diversos criterios para el diseño de presas CFRD y CFGD, asimismo que los casos de filtraciones se deben a fisuras y agrietamientos en la cara de concreto, para lo cual se puede tratar de diversas formas, conociéndose un caso en China sobre la falla de presa por mal manejo de aguas máximas, defecto en junta de losa-parapeto y filtraciones con arrastre de material.

Respecto a los modelos numéricos en filtraciones, tenemos a (Ivanchuk N., Maartynyuk P., Tsvetkova T. y Michuta O., 2017) quienes trabajaron en los modelos matemáticos y la simulación por computadora de procesos de filtraciones en presas de tierra. La Investigación es explicativa sobre los procesos que se encuentra inmerso la filtración en las presas de tierra mostrándolas a través de la modelación numérica. Los instrumentos utilizados son la revisión documentaria sobre los problemas de las filtraciones en presas de tierra. Concluyeron que el método numérico permite representar la ocurrencia de la filtración en las presas de tierra en la cual se analiza las propiedades físico-químicos de los materiales y del flujo. La existencia de una zona de erosión interna en el cuerpo de la presa afecta de manera significativa el gradiente hidráulico.

Asimismo, (Álvarez M., Álvarez L. y Vásquez R., 2017) trabajaron sobre la evaluación de riesgos en presas de tierra así como modelaron soluciones de carácter técnico sobre filtraciones en ese tipo de presa. La investigación es explicativa, evalúa y analiza tres tipos de geometría de los filtros que permitan evaluar las filtraciones en el embalse Zaza de Cuba. Los instrumentos utilizados son la información documentaria y la modelación bidimensional mediante el método de elementos finitos. Concluyeron que en el embalse requiere una construcción de filtro tipo prisma, a nivel de estabilidad de taludes permite tener valores por encima del mínimo necesario.

Por otro lado, tenemos (Intertechne 2015) que realizó el Análisis de filtraciones de la Presa Palo Redondo. Para el análisis utilizó como

instrumentos la revisión documentaria, criterios para diseños de materiales de presas sueltas, asimismo se apoyó en el programa SEEP para efectuar la modelación numérica. Concluyó que los materiales utilizados para el diseño del relleno de presa permiten mantener la estabilidad de la presa en el escenario más adverso (sin contar el sobrevertido), que es el supuesto de rotura de la cara de concreto.

Por otro lado, (Guarniz, 2014), desarrolló una investigación sobre un comparativo de los modelos hidráulicos unidimensional a través del programa computacional HEC-RAS y análisis bidimensional mediante el programa IBER; la investigación desarrolló el análisis de la rotura de presas en materiales sueltos, esta investigación fue aplicada a la presa Palo Redondo. La investigación es explicativa al desarrollar la simulación con datos obtenidos de literatura de los materiales usados en el diseño de la presa. Los instrumentos utilizados en documentación, informes y como soporte los programas Hec-Ras e Iber, en la cual modeló el supuesto de rotura de la Presa comparando los resultados de ambos modelos. Concluyó que el modelo de IBER obtuvo mayor correlación de la modelación, siendo entre los 2 modelos el más adecuado para hacer la modelación de rotura de presa.

Otra investigación en el territorio nacional sobre la estabilidad de presas, fue realizada por (Velasquez, 2013) quien investigó sobre la estabilidad de la presa construida en la laguna Quengococha en el Proyecto de Irrigación Cajabamba, Cajamarca. La investigación es explicativa-aplicada al evaluar dos alternativas de secciones de la presa. La metodología seguida fue de efectuar estudios técnicos en la zona de la presa a fin de determinar la sección más idónea. La investigación concluyó en la necesidad de utilizar geomembrana a fin de dotar a la presa de mayor estabilidad.

Asimismo, se tiene experiencia en presas CFRD construidas con fines agrícolas, es el caso de la presa Limón para el Proyecto Olmos. Al respecto, (Lyapichev, 2012) evaluó el diseño de la presa en mención. La metodología utilizada fue la revisión documentaria y los estudios especializados realizados. Los instrumentos utilizados fue la recolección de datos y el uso del software SLIDE. Concluyó que el diseño de la presa es adecuado para

el caso de embalse llenado de acuerdo a lo previsto en el diseño, sin embargo, no es la óptima debido a no estar justificado de manera técnica y económica, uno de los motivos es considerar 2 fases constructivas en tiempos distintos.

Las fuerzas de filtración generan inestabilidad de los taludes lo cual repercute en el factor de seguridad. A través de los materiales granulares se logra que las filtraciones que atraviesa el cuerpo de presa no genere altas presiones negativas que repercuta en la seguridad de la estructura toda vez que el gradiente hidráulico decrece de manera importante (Li, 2011).

Siguiendo con las investigaciones de análisis numérico de filtraciones, resulta importante contrastar los cálculos realizados en los diseños de la presa, a través de la estimación de la filtración en la presa y revisar la estabilidad de la misma. En ese sentido, (Tapia, 2009) realizó el análisis numérico que involucró evaluar el proceso de filtración en presas de escollera. El diseño de la investigación es explicativo a través del análisis de los materiales que se utilizaron en la construcción de las presas antes mencionada, con ello efectuó el cálculo de las filtraciones que se producen en la presa. Los instrumentos utilizados son la recopilación de datos de diferentes materiales utilizados durante la construcción de presas de escollera, con ello efectúa la simulación de las filtraciones mediante el programa numérico KRATOS, que fue desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). La investigación concluyó que el modelo numérico de CIMNE que reproduce la filtración de la presa y que comparado a modelos experimentales se asemeja a los modelos teóricos, asimismo que en el relleno de presa de materiales sueltos, la relación entre el gradiente hidráulico y el caudal (ley de Darcy Lineal) no tiene total validez, sin embargo las ecuaciones empíricas logran representar la relación entre el gradiente y el caudal en medios granulares, desde la cual se puede determinar la superficie libre y la línea de filtración en la presa.

Respecto a investigaciones relacionadas sobre seguridad de presas, se tiene a (De Cea, 2007) quien investigó la seguridad de presas de tierra y escollera. El diseño de la investigación empleado fue explicativo través de la

revisión documentaria de informes especializados en seguridad de presas. Los instrumentos utilizados fueron los artículos científicos, estudios e informes sobre seguridad de presa y análisis de riesgos para apoyar decisiones en materia de seguridad. La investigación concluyó que, en las presas de materiales sueltos, es indispensable efectuar monitoreos continuos con la finalidad de detectar de manera temprana las filtraciones e indicios de erosión interna para garantizar la seguridad de la presa.

2.2. Marco Teórico

Presa

Una presa es definida por la Real Academia Española como un muro grueso de piedra u otro material que se construye a través de un río, arroyo o canal, para almacenar el agua con la finalidad de derivarla o regular su curso fuera del cauce. De acuerdo con (Espinoza, 2010) y con la Comisión Internacional de Grandes Presas (ICOLD) se categoriza como grandes presas aquellas que tiene una altura mayor igual a 15m, o si está comprendida entre 10m y 15m tenga un aliviadero capaz de evacuar crecidas de $2,000\text{m}^3/\text{s}$, embalse superior a 1hm^3 , longitud de coronamiento mayor de 500m con condiciones difíciles de cimentación. En caso de la presa Palo Redondo, se encuentra dentro de la clasificación de grandes presas al tener una altura de diseño de 97m y almacenamiento de 401hm^3 .

Presa de tierra

De acuerdo con (Morán, 2013), una presa de tierra con cara de concreto (CFRD por sus siglas en inglés) es construida con materiales sueltos, en la parte aguas arriba con una cara de concreto para impermeabilizar la presa, y por lo general con material enrocado 3D o escollera en la espalda aguas abajo, estas presas son vulnerables a colapso por sobrevertido o por fenómenos de filtración de caudales que sobrepasan el rango permisible.

Filtraciones en presas de tierra

Las filtraciones en las presas han sido desarrolladas en diferentes espacios y tiempos, en ese sentido, (Morán, 2013) señala respecto a la filtración en las presas que la circulación de los caudales altos que atraviesan el interior del espaldón (aguas abajo) puede provocar en algunas ocasiones la formación de

flujos de filtración que circula el agua a través de los espacios (huecos) de la escollera (enrocado 3D), esta situación es generada siempre que el número de Reynolds pertenezca a un movimiento turbulento. En ese sentido esta filtración, naturalmente no prevista en el diseño de la presa, genera un incremento en la presión de poros causando presiones intersticiales que conllevan a desestabilizar el talud de la presa, lo cual es diseñado mayormente con la consideración de funcionamiento sin flujo de agua a través del cuerpo de presa, es decir funcionamiento en seco.

Para analizar el origen de los caudales de filtración, es necesario revisar las fallas en la presa, pudiendo ser entre otras, falta de evacuación de avenidas extraordinarias, averías graves en el elemento impermeabilizante, piping, arrastre de materiales, entre otros. En estas situaciones, el talud aguas abajo de la presa puede resultar rápidamente dañado, por lo cual queda el elemento impermeable sin el soporte adecuado, máxime que está sometido a importantes presiones y esfuerzos, pudiendo conllevar a la rotura de la presa.

Actualmente en muchos países desarrollados en su ingeniería y tecnología, tienen regulación especial normativa donde los estándares de seguridad son altos, con la finalidad de mitigar los potenciales riesgos de colapso de la presa, pues ante un eventual desastre causaría enormes pérdidas económicas y de vidas humanas.

Como se ha descrito, la filtración que tuviera lugar en el cuerpo de la presa puede provocar erosión interna, ante ello debemos desarrollar lo concerniente a este aspecto. En esa línea, (Morán, 2013) manifiesta que un mal funcionamiento del elemento o estructura de impermeabilización del cuerpo de presa y del cimiento pueden ocasionar un caudal de filtración muy elevado conllevando a causar daños o falta de estabilidad debido al desarrollo de subpresiones en el espaldón aguas abajo, llevando al colapso de la presa.

Moran cita a Jansen, citando a su vez a Leps, quien analiza el fenómeno de la anisotropía en presas de materiales sueltos. El estudio señala que la permeabilidad en este tipo de material es muy variable motivo por el cual, salvo los materiales lavados, no es posible conocer la ley de filtración que gobierna el fenómeno (Jansen, 1988; Leps, 1973). Moran señala que el efecto

de la segregación del material que hayan sido provocados por roturas del material durante la compactación de las capas de compactación, produce una importante variación de la permeabilidad en la extensión de su espesor. Asimismo, Moran indica que la relación entre la permeabilidad horizontal y la vertical puede llegar a superar el valor de 100.000:1. Por su parte, Jansen, manifiesta que solo los materiales limpios y homogéneos, con escasa segregación puede asimilarse a la ley de filtración parabólica.

Por su parte, Moran refiere a Cruz quien estudió la anisotropía capa de compactación; propone un factor de anisotropía global (ϵ), definiendo como la relación entre la permeabilidad horizontal y vertical (Cruz, P. y Lobo, R., 2004; Cruz, P., Materón, B. y Freitas, M., 2009). En este sentido, Cruz introduce el concepto de permeabilidad equivalente para la dirección horizontal y vertical, definiendo a través de la interpolación lineal la permeabilidad de la subcapa más superficial con la subcapa inferior.

Erosión en presas de tierra

Moran a través de citar a (Toledo, 1997) señala algunos presupuestos sobre la erosión en materiales no cohesivos, lo cual viene a ser el mecanismo mediante el cual se produce de manera acoplada con deslizamiento superficiales, también que la zona crítica del deslizamiento producen grandes gradientes hidráulicos orientado al espaldón de la presa, señala que el proceso logra iniciar mediante singularidades con progresión, y lograr proteger el deslizamiento es a través de un adecuado tamaño del pie de presa.

Suelos saturados

Los suelos saturados están compuestos por 2 fases, agua continua y sólido. En esa situación las presiones intersticiales son positivas, denominado esfuerzo positivo (Terzaghi, 1936). Terzaghi explicó que el efecto del cambio de presión se debía a las tensiones efectivas.

Suelos parcialmente saturados

Los suelos parcialmente saturados son los que se encuentran en las zonas donde hay nivel freático y la superficie del suelo, siendo la presión del agua en los poros negativa. Esta zona se constituye en una transición del agua del suelo y la atmósfera (Fredlund, 1994).

Diversos autores señalan que los suelos parcialmente saturados se componen en un sistema de tres fases. La fase sólida se refiere a las partículas sólidas en estado no saturado tiene influencia en los esfuerzos. La fase líquida compuesta por agua, sea la higroscópica, capilar y gravitacional que influyen los esfuerzos del sistema. La fase gaseosa compuesta por aire.

Succión de suelos parcialmente saturados

Es la capacidad de absorber y retener agua, en el suelo parcialmente saturado la succión total representa el potencial del agua en el suelo, siendo la suma de la succión matricial y osmótica. En la zona donde se produce las presiones negativas del agua respecto al aire provoca presiones intersticiales negativas. La diferencia de esas presiones es la succión matricial (Hernández, 2011).

Filtración, estabilidad y modelación numérica

Moran citando a Stephenson corrobora que la estabilidad al deslizamiento por arrastre de material del cuerpo de la presa logra ser más crítica que la estabilidad al vuelco en las partículas resulten estar aisladas y que puedan estar sometidas a un caudal de agua a través de un plano horizontal (Stephenson, 1979).

El modelo de filtración se puede realizar con la ley de resistencia lineal (ley de Darcy), si bien en los antecedentes la investigación de Tapia (2009) concluyó que no resulta aplicable esta Ley para estimar la filtración en materiales sueltos; sin embargo (Parkin, 1971) y (Toledo, 2004) señalan que si bien la Ley de Darcy no puede aplicarse en las modelaciones de materiales granulares con movimiento turbulento, si es posible que en el análisis local del caudal de salida en la zona del pie de presa, las líneas isobaras resultan coincidentes con la ley parabólica.

La modelación que se efectuará en el presente trabajo de investigación será a través del programa MIDAS GTS NX versión 2020. MIDAS GTS NX, es un software de análisis de elementos finitos aplicado a diseños y resolución de problemas geotécnicos, incluyendo cimentaciones profundas, excavaciones, sistemas de túneles, análisis de filtración, análisis de consolidación, diseños de muros de contención, análisis de estabilidad de taludes en presas y taludes

naturales, incluye análisis dinámicos. Este programa cuenta con una plataforma de modelación avanzado con altos niveles de precisión y eficiencia. El software puede calcular los flujos en régimen permanente o variable, tanto en medio parcial o totalmente saturados, usa el código de malla fija del tipo euleriano para resolver la ecuación de Laplace que rige la filtración lineal para modelo bidimensional.

De manera complementaria, y a fin que se pueda revisar la implicancia de la filtración en el cuerpo de la presa, se realizará el análisis de la estabilidad de la presa, para ello se utilizará el método de equilibrio límite. Este método es considerado válido para realizar la evaluación del coeficiente de seguridad frente al deslizamiento en las presas de materiales sueltos (Morán, 2013). El análisis de seguridad conllevó a emitir diferentes normas relacionadas a la seguridad, así también utilizando el método de Bishop para presas de materiales sueltos, este método utiliza superficies de rotura circulares para el análisis al deslizamiento (Bishop, 1954). Los suelos parcialmente saturados tienen comportamientos de incremento de factor de seguridad cuando la masa es menos húmeda. Los valores de factor de seguridad disminuyen en desembalses rápidos (Burgos, et. al., 2018).

Para el caso de los materiales del cuerpo de la presa no cohesivos, en deslizamientos planos, se aplica el método de Bishop mediante radios de curvatura elevados. El programa MIDAS GTS NX utiliza el método de equilibrio límite para analizar la estabilidad de la presa, así también el método SRM (Método de reducción de resistencia) para el análisis bidimensional y tridimensional.

El método de equilibrio límite tiene por finalidad calcular el factor de seguridad que afecta a la estabilidad de los taludes y una superficie de deslizamiento conformado de rocas sueltas o suelos que incluya componentes de cargas estáticas, dinámicas, tensiones, nivel freático, propiedades de los materiales de suelos o rocas (González, 2017).

El método de SMR analiza el comportamiento de las rocas que pueden interactuar con suelos y componentes de fenómenos complejos de tensiones, fracturaciones, decompresión, efectos térmicos, tensiones tectónicas entre

otros, el factor SMR se obtiene de la suma del índice RMR¹ por un factor de ajuste, obteniéndose factores fiables del comportamiento del talud, con un cierto valor pesimista en escenario de estado futuro de cuerpo (Romana, et. al., 2003).

Caso de estudio: Presa Palo Redondo

De acuerdo al estudio de factibilidad del Proyecto Especial Chavimochic elaborado en el 2013, el objetivo principal de la de la Presa Palo Redondo es la regulación del río Santa dentro de la tercera etapa del Proyecto Especial CHAVIMOCHIC, la cual permitirá la irrigación de alrededor de 63,000 has de tierras nuevas y mejorará el riego de otras 47,000 hectáreas, además de contribuir a potencializar la producción de otras 40 mil hectáreas que se encuentran en plena actividad en los valles de Chao, Virú, Moche y Chicama y con la consecuente generación de puestos de trabajo en la región La Libertad.

Estas obras básicas permiten además dotar de agua potable a la ciudad de Trujillo y generar energía hidroeléctrica para consolidar el desarrollo urbano y agroindustrial de la zona.

Las principales características de la Presa y Embalse de Palo Redondo, son: Tipo: Gravedad de materiales sueltos, con pantalla de cara de concreto, 97m de altura, con área de drenaje 392 km², diseñada para una avenida máxima probable 2,799 m³/s, el nivel de agua máximo normal en la cota 344 msnm, el nivel de agua máximo excepcional 347 msnm., el nivel de agua máximo de seguridad 347.70 msnm., y un nivel de agua mínimo normal 290,00 msnm., con un cota de coronación - calzada 347 msnm., la cota de coronación - pretil de hormigón es la 348 msnm., con un volumen del embalse en la cota 344 m de 401 hm³, y un volumen útil del embalse 366 hm³.

Información Presa Palo Redondo

La presa "PALO REDONDO" es una presa de grava compactada, con cara de concreto hacia aguas arriba, denominada CFRD, siglas de Concrete Face Rockfill Dam.

¹ https://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_IndiceSMR.pdf

Los principales componentes de la Presa “Palo Redondo” son: la conformación del cuerpo de la presa (el relleno), el plinto, la pantalla diafragma de concreto, la cara de concreto, los muros de coronación y la instrumentación.

La presa esta cimentada sobre un aluvial de profundidad variable en la zona del valle y en los estribos, sobre una roca medianamente alterada.

La altura de la presa “Palo Redondo” en su sección máxima alcanza los 97 m, considerando un nivel de fundación de cimentación 251 msnm.

Sobre la cota 344 msnm., se tiene un parapeto de concreto armado, la altura del parapeto de la presa es de 4 metros definido de acuerdo a la referencia: “Consideration on the seismic design of high concrete face rockfill dams (CFRDs) – Bayardo Materón y Gabriel Fernández”. Por arriba de la elevación 347 msnm. el parapeto sigue sin relleno sirviendo como barrera de seguridad para vehículos hasta la elevación 348 msnm.

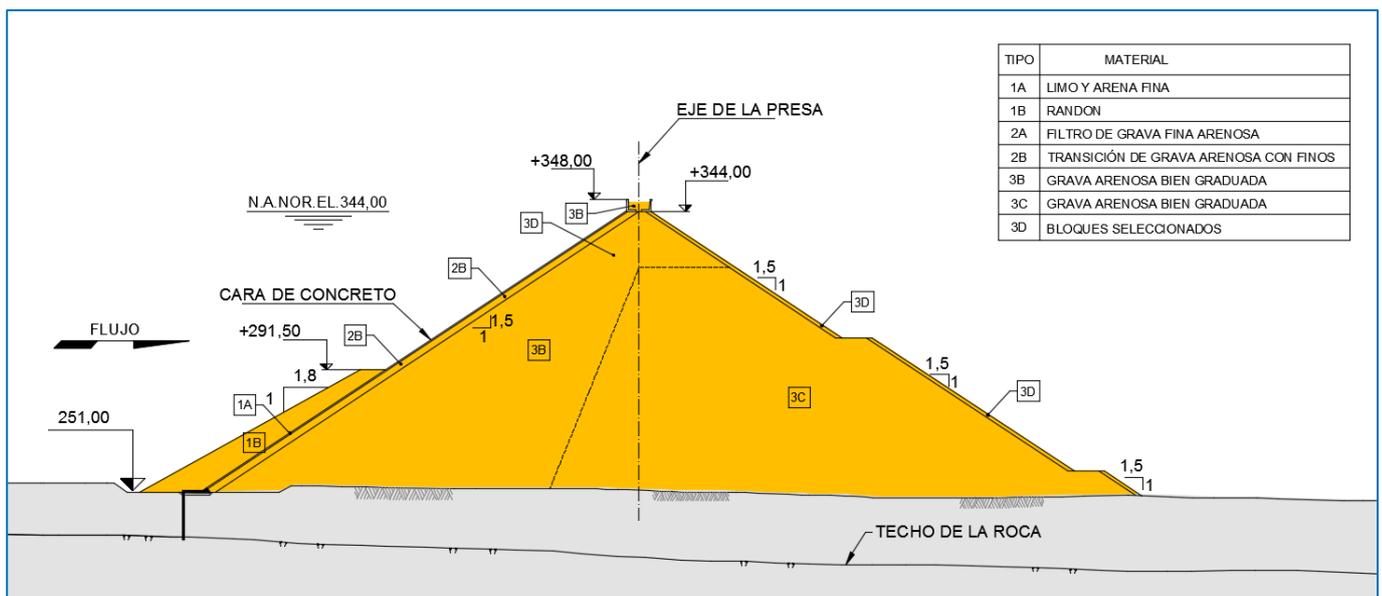


Figura 1. Presa Palo Redondo – Sección Transversal.

Relleno de la Presa

La Presa tendrá una altura total de 97 m. Sus dimensiones aproximadas son longitud de cresta 820 m, ancho de cresta 8 m, ancho en el fondo del cauce 520 m, distancia entre pies de taludes aguas arriba y aguas abajo 300 m.

El relleno de la Presa está constituido por un volumen de cerca de 8.8 hm³, conformado por materiales de tipos diferentes, según la función propia de la zona en que serán aplicados.

Plinto

El plinto es la estructura de concreto que conecta la cara de concreto con el basamento rocoso. Se tiene plinto margen derecha, margen izquierda y fondo de quebrada. En la extensión del plinto se realiza las inyecciones de tipo I, II y III para la impermeabilización en el estrato rocoso.

Pantalla Diafragma de Concreto

La pantalla diafragma de concreto también llamada pantalla plástica consiste en una placa de concreto que se construye a lo largo del plinto en el cauce de la quebrada. El objeto de la pantalla es constituir una barrera impermeable, lo cual será complementado con la ejecución de una cortina de inyecciones en el eje de la pantalla.

El diseño geométrico del proyecto establece que la pantalla tendrá un ancho de 0.80m, con una longitud que abarca toda la extensión del plinto en el cauce de la quebrada, esto es 520m aproximadamente. La profundidad será variable, previéndose que podrá extenderse hasta 1m por debajo del nivel de roca firme.

Instrumentación

Dentro de la instrumentación prevista para la presa, se incluyen distintos instrumentos que tienen como función controlar el comportamiento de la presa en su conjunto y de algunos aspectos en particular, tal como las deformaciones de las juntas. Entre los instrumentos se tiene los piezómetros, cajas suecas.

Accesos Constructivos

Se dispone de un total de 26 Accesos Constructivos, la mayor parte de ellos atenderán directamente el transporte de materiales para relleno de la Presa.

Camino de Acceso a la Presa Palo Redondo – Variante

La construcción de la Presa implicó la interrupción de la vía de acceso a la bocatoma, una vez que se iniciaron los trabajos del cuerpo de presa. Por tal

motivo se previó la construcción de una vía que evite tal interrupción mediante el desvío correspondiente.

Esta vía denominada Camino de Acceso a la Presa Palo Redondo - Variante, tiene una extensión de 7.5 km, con un ancho de 6 m para dos carriles, con bermas de 0,50 m en cada lado y con superficie de rodadura en mortero asfáltico, con espesor de 1,2 cm. Cuenta con un túnel carretero de una longitud total de 591 m de largo.

Toma de Aducción

Esta estructura permitirá la captación permanente de las aguas del embalse para ser conducidas por el Túnel de Aducción.

Túnel de Aducción

Este túnel parte de la Toma de Aducción, en la cota de niv.+278.30 msnm y conducirá el flujo de agua proveniente del embalse hasta entregarlo al Túnel de Restitución, mediante la Casa de Válvulas, el que a su vez lo entregará al Canal Madre.

Este túnel tiene una extensión de 441 m, su sección es en forma de herradura y con un diámetro de excavación de 5.50 metros. Será revestido con concreto de espesor 0.40 m, con diámetro hidráulico de 4.70 m, con cota solera 278.30 msnm en su punto inicial, con una capacidad de caudal de 78 m³/s.

Túnel de Restitución

Este túnel parte desde el cuenco luego construida luego de la Casa de Válvulas, en la cota de niv.+257.70 msnm. Su función es la de conducir el flujo de agua que provenga del embalse a través del Túnel de Aducción, hasta entregarlo al Túnel Intercuencas que hace parte del Canal Madre.

Este túnel tiene una extensión aproximada de 2,610 m. Su sección es en herradura, con solera horizontal y pendiente de 3/1000 y con un diámetro de excavación de 7 m. Permitirá derivar un caudal de 78 m³/s.

Túnel Aliviadero

Este túnel tiene una extensión de 345 metros. Su sección es de forma de herradura. Será revestido con concreto armado de espesor 0.40 metros.

La planimetría del aliviadero es formada por una curva considerable y un salto a un cuenco amortiguador de 10 m debajo del aluvial.

Casa de Válvulas

Se ubica al pie de presa aguas abajo, sobre la margen derecha, constituye el sector donde se produce la primera descarga del flujo de agua que proviene del embalse.

Ataguía Aguas Arriba

La Ataguía tiene como objeto proteger las obras de la Presa ante posibles avenidas que puedan ocurrir durante el periodo de construcción.

La ataguía 1 se ubica sobre el cauce de la quebrada Palo Redondo, con su eje longitudinal aguas arriba del túnel intercuenca, tiene una longitud de 635 m. La cota de coronamiento está en el niv.+290.50 msnm.

La ataguía 2 se ubica sobre el cauce de la quebrada Palo Redondo, con su eje longitudinal aguas abajo del túnel intercuenca, tiene una longitud de 691 m. La cota de coronamiento está en el niv.+281.00 msnm.

2.3. Marco Conceptual

Una presa es definida por (ICOLD, 2011) como una barrera o una estructura colocada cruzando un curso de agua o de un río para retener el agua y así controlar el caudal. Las presas varían de tamaño, pudiendo ser un pequeño terraplén de tierra, a menudo para el uso de una granja, y otras pueden llegar a ser altas estructuras macizas de hormigón que sirven generalmente para el abastecimiento de agua, la energía hidroeléctrica y el riego.

Por su parte, el ICOLD indica que las presas de tierra o terraplén están construidas con relleno de tierra o una combinación de relleno de tierra y roca. Por lo tanto, las presas de terraplén generalmente se construyen en áreas donde hay gran cantidad de tierra o rocas disponibles. Este tipo de presas representan el 75% de todas las presas del mundo.

Las presas se diferencian por su tipología, función, dimensiones. Una gran presa es definida por (ICOLD, 2011) como la que tiene una altura de 15 metros o más desde los cimientos más bajos hasta la cresta, o una presa de entre 5 y 15 metros que incauta en más de 3 hm³.

En las presas resulta importante analizar las filtraciones (ICOLD, 2011). Las filtraciones son la fuga del agua del embalse a través de las estructuras de la presa, pudiendo producir erosión interna en el cuerpo y en el cimiento. Esta situación puede originar la falla de la presa. En ese sentido, la falla es causada de acuerdo por el ICOLD como falla estructural de los materiales utilizados en la construcción de la presa y el mantenimiento inadecuado.

Al revisar las filtraciones, resulta inherente analizar la permeabilidad de los materiales sueltos de la presa. La permeabilidad según la (FAO, 2019), es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire.

Considerando que las filtraciones pueden ocasionar erosión interna en el cuerpo de la presa, tenemos que tener en cuenta la seguridad de las presas, que según el ICOLD las aproximadamente 36,000 represas grandes enumeradas en el Registro Mundial de Presas, se han reportado alrededor de 300 accidentes; por ello diseñar y construir una presa no es un ejercicio sencillo y temporal. La estructura debe ser supervisada e inspeccionada continuamente durante toda su vida, para garantizar que se mantenga en buen estado.

En presas CFRD los materiales están sometidos a medios parcialmente saturados, motivo por el cual es necesario que el porcentaje de finos no supere el 5% a fin de evitar, entre otros aspectos, el efecto expansivo de las arcillas al tener contacto con el agua (Beltrán, 1995). La implicancia del análisis de un suelo parcialmente saturado se relaciona a los esfuerzos, deformación y flujo. Los cambios del nivel de agua guardan relación con el gradiente de agua a través de un medio poroso. La presión de los poros influye en la estabilidad en el talud y las deformaciones laterales (Meza, 2012).

La estabilidad de talud indica el grado de resistencia la cortante en una superficie de corte respecto a la masa del suelo (Flores, et. al., 2020). En las presas de tierra en periodos prolongados de sequía, conlleva que el nivel de agua en la presa disminuya, lo que provoca que el factor de seguridad también disminuya, lo mismo en situaciones de desembalse rápido (Flores, et. al., 2020).

2.4. Sistema de hipótesis

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicadores	Instrumento
VI: Material aluvial	Material sólido granular que se encuentra en un lecho de un río, fragmento de rocas producto de erosiones, meteorización y desgaste por transporte (Basile, 2018).	De acuerdo a la granulometría, se usa para construcción de diques o presas con un grado de compactación requerido de acuerdo al diseño de la estructura.	Propiedades Geotécnicas	Coeficiente de Permeabilidad	Pruebas de campo
			Propiedades mecánicas	Peso específico	Pruebas de campo
VD: Filtración	Paso de un flujo o fluido en un medio poroso (Toledo, 1997).	Mide la cantidad de flujo que pasa por una sección de un cuerpo poroso.	Caudal	m ³ /s	Cálculo Numérico (programa MIDAS GTS NX)

CAPÍTULO III. ESTUDIOS DE INGENIERÍA

Esta sección amplía el detalle de la ingeniería y diseño de la presa. La información ha sido recabada del Expediente Técnico 1 de la Presa Palo Redondo, desarrollada por el Concesionario, revisada y aprobada por el Supervisor.

3.1. Parámetros de Diseño de la Presa Palo Redondo

El estudio de ingeniería de la Presa Palo Redondo está constituido por el Expediente Técnico y las ingenierías de detalle desarrolladas para la construcción de la Presa y sus obras auxiliares.

Considerando el objeto de la investigación, nos abocaremos a indicar los parámetros de diseño del relleno de presa lo que incluye las consideraciones para la filtración y la estabilidad, sin perjuicio que se haga referencia algunos datos necesarios para conceptualizar adecuadamente el diseño de la Presa Palo Redondo.

3.2. Diseño geométrico de la Presa

La presa ha sido diseñada sobre material aluvial en el fondo de la Quebrada Palo Redondo, apoyando el Plinto en el aluvial. El plinto se articula en el fondo de quebrada con la roca madre a través de una pantalla plástica mediante un concreto elastoplástico (1.5Mpa), y se une con los estribos izquierdo y derecho con la roca de ambos márgenes considerándose aceptable roca con Rock Mass Rating (RMR) igual o mayor a 40, y se conecta con la cara de concreto en toda la zona del talud aguas arriba de la presa. Tanto en la pantalla plástica y en los estribos se realiza impermeabilización mediante lechada de cemento.

La barrera impermeable, se localiza en el talud de aguas arriba y consiste en una losa de concreto de espesor variable de 0.5m a 0.3m denominada cara de concreto. La unión de la cara de concreto con los estribos derecho e izquierdo se forma a través del plinto, lo cual es anclado a la roca mediante varillas de acero corrugado de alta resistencia e inyectado con mortero de cemento, desde la cual se ejecutan las inyecciones de contacto concreto-roca, consolidación e impermeabilización de la roca, y mediante una pantalla de concreto plástico empotrada en la roca madre en el fondo de quebrada.

El talud de la presa aguas arriba y aguas abajo es de 1H:1.5V. En el talud aguas abajo (enrocado 3D) se construye camino de acceso hacia la corona de la presa. En la Figura 02 se muestra la sección típica de la Presa.

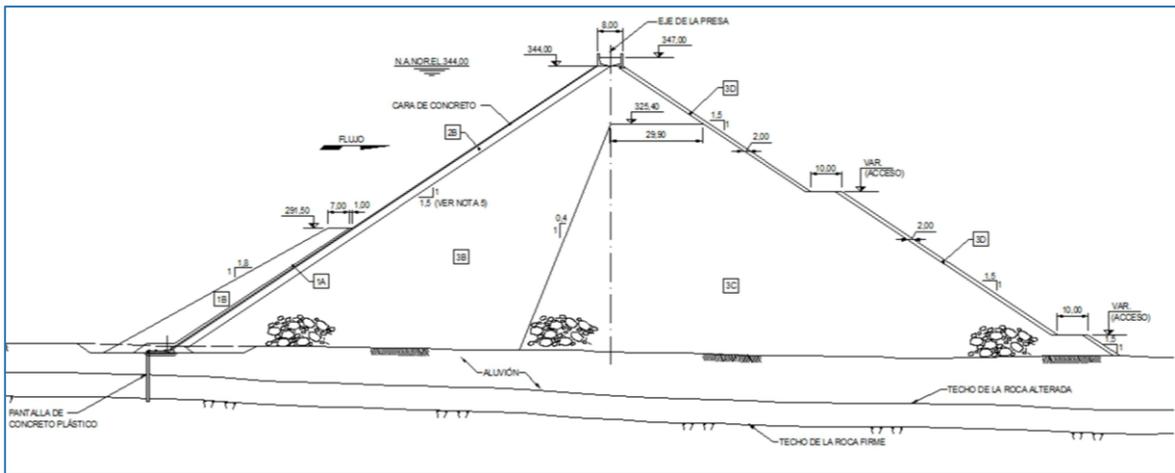


Figura 2. Sección de la presa - Materiales.
Fuente: Expediente Técnico 1, Presa Palo Redondo.

3.3. Materiales del Relleno de la Presa

Los materiales de la presa, así como sus características granulométricas y zonificación cumplen con los requisitos especificados de granulometría, relación de vacíos y densidad una vez depositados, tendidos y compactados en la presa.

Un criterio relevante y condicionado es que no se permite la colocación de materiales sueltos con porcentaje de finos menores al 5% en peso, salvo indicación técnica en contrario dadas las investigaciones posteriores al diseño de la presa.

El material 1 A consiste en una arena fina limosa sin partículas arcillosas.

El material 2A es un producto procesado en la zona de la presa mediante zarandeo de grava arenosa limosa de los bancos de aluvión, bien graduada, tamaño máximo de 1.9 cm (3/4").

El material 2B es producto del procesado por zarandeo a partir del aluvión en el cauce de quebrada de la presa, con tamaño máximo de 10cm, sin remoción de los finos.

El material 3B es grava arenosa bien graduada y tamaños máximos de 50 cm.

El material 3C es grava arenosa bien graduada y tamaños máximos de 60 cm.

El material 3D es grava gruesa seleccionada de protección formada por bloques de aluvión con un diámetro máximo de 0.60m. El material se coloca en bloques arreglados al cuales no se aplica faja granulométrica.

En la Figura 03 se muestra las fajas granulométricas de los materiales de la presa. Las fajas granulométricas de los Materiales se muestran en el anexo 01 de la presente investigación.

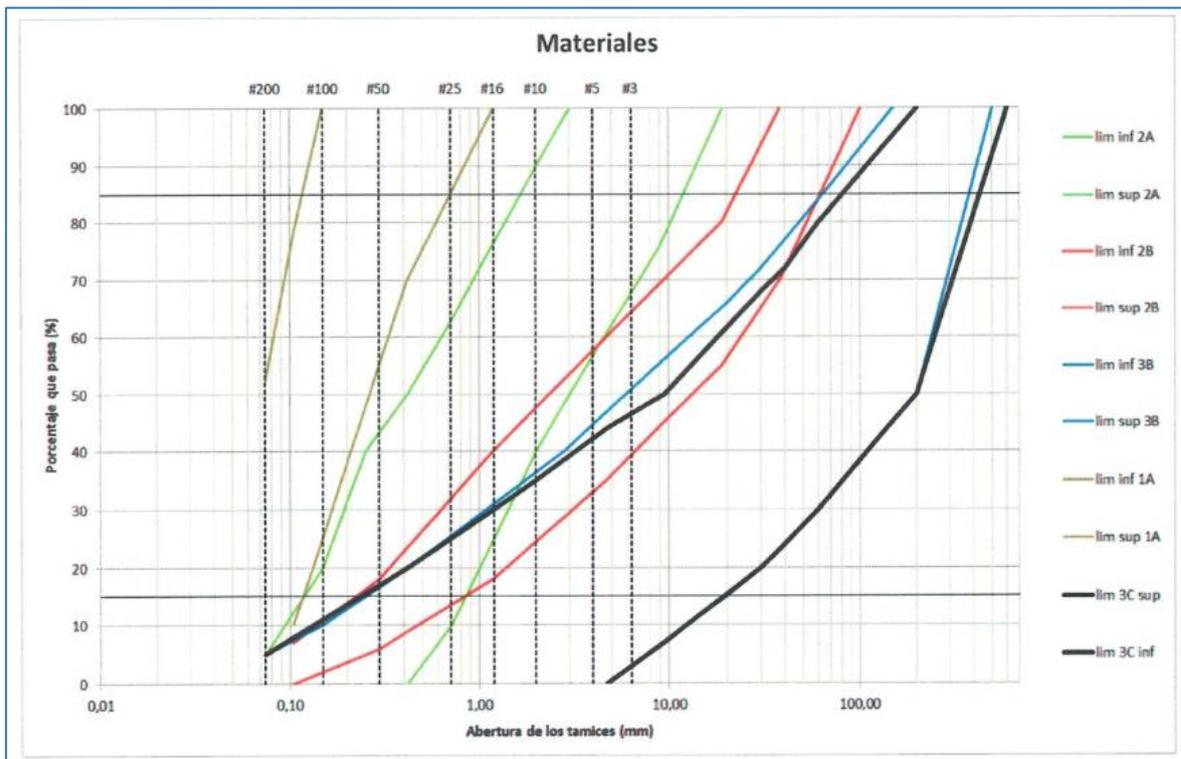


Figura 3. Fajas granulométricas de los materiales de la presa.
Fuente: Expediente Técnico 1, Presa Palo Redondo.

El ancho del material 2B es de 4.0m, fue definida una proporción de un tercio de la dimensión total de la base para el material 3B, siendo el resto construido con material 3C.

La finalidad del material 3B es crear una zona adyacente a la losa, de elevado módulo de deformabilidad y alta permeabilidad, de manera a reducir las deformaciones inmediatamente abajo de la cara de concreto y controlar infiltraciones eventuales ocurridas a través de fracturas o grietas en la losa. Para cumplir este último punto, el material debe ser internamente estable y servir como material de retención del limo existente aguas arriba de la losa o lanzado sobre la misma, en caso de pérdidas de agua excesivas.

Para el material 2B, se verifica que no hay necesidad de procesamiento. Simplemente se remueven las partículas mayores a 100mm del material natural del cauce (por tamizado).

La proporción de un tercio mínimo de la fundación para límite entre los materiales 3B y 3C fue definida, de manera a garantizar, de acuerdo a la práctica actual, que un poco más de la mitad de aguas arriba de la presa presente un elevado módulo de deformabilidad, reduciendo las deformaciones del pedraplén y de la losa durante la construcción de la presa y llenado del embalse.

Se verifica que los materiales 3B y 3C deben tener buena capacidad drenante, por el poco contenido de finos. Así no es necesario contar con una capa de material 2B en la base de toda la presa, desde que se aplique material con bajo contenido de finos conforme la curva granulométrica establecida, tomándose cuidado especial en las primeras capas del relleno.

Las gravas arenosas bien graduadas compactadas con rodillo vibratorio hexagonal de 26 toneladas son materiales que logran índices vacíos muy bajos, menores que 0.22, módulos de deformabilidad muy altos, en general mayores que 250 a 300MPa, y densidades elevadas, resultando contar con la presa con deformaciones muy pequeñas. Las características de los aluviones locales permiten utilizarlos sin procesamiento alguno. Las zonas 3B y 3C presentan un espesor de capa, 1.10 m en el material 3B y 1.10 m en el 3C, lo cual es compactado a través de 9 pasadas logrando llegar a 1.0 m luego de la compactación.

El material 3D (aguas abajo) tiene un espesor de 2.0 m de ancho para la facilidad constructiva, colocado de manera que asegura estabilidad a través del apoyo horizontal, acomodadas y apoyadas hacia el material 3C para evitar que éste forme depósitos inestables o susceptibles de deslizamiento.

La magnitud del asentamiento y deformaciones de la presa está en función de la altura de la presa, del módulo de deformabilidad de las gravas compactadas y de la forma del valle. En la presa de Palo Redondo, donde el valle es muy ancho, los módulos son menores y las deformaciones un poco mayores que en

las presas de grava en valles angostos. Para la presa se espera que el módulo de deformabilidad sea alto y la deflexión de pocos centímetros.

Los materiales que constituye la presa de acuerdo a la construcción, son los que se muestra en el Cuadro N° 1.

Cuadro N° 1. Materiales del relleno de la Presa.

ZONA	MATERIAL	φ MAX (cm)	Finos (% #200)	Espesor Capa (cm)
1A	Limo y Arena	0.118	---	25
1B	Randon	20.00	---	40
2A	Filtro de grava fina arenosa	¾"	<5%	30
2B	Transición de grava arenosa con finos	10.00	Sin remover	30
3B	Grava arenosa bien graduada	50	<5%	110
3C	Grava arenosa bien graduada	60	<5%	110
3D	Bloques seleccionados	---	---	--

Fuente: Expediente Técnico 1.Presa Palo Redondo.

3.4. Fundación y Tratamientos de la Presa

En toda el área de fundación de la presa se realizó la limpieza superficial removiendo la capa vegetal, restos de material vegetal, materiales provenientes de derrumbes de los cerros, rocas inestables, entre otros.

En el área del plinto la excavación llega a la roca apropiada para la fundación del plinto, conforme a la geología a lo largo de esta estructura. En el proceso constructivo por etapas, se dejó este ancho libre, sin lanzamiento del material 2B para permitir la construcción del plinto y el tratamiento de la roca de fundación. Los tratamientos de la fundación de roca son hechos, normalmente, por excavación de eventual roca muy alterada y sustitución por concreto dental, localmente complementado por concreto lanzado y colocación de materiales de filtro tipo 2A.

La colocación de filtro 2A sobre la roca de fundación se efectuó tanto en el ancho como en el frente del plinto, para permitir el acceso de equipamiento, como en toda el área de fundación en roca de los estribos.

No se colocó los materiales 2A y 2B antes de realizar los trabajos relativos a la construcción del plinto como son: el anclaje, el colado del concreto del plinto, la colocación de los sellos de cobre y neopreno y la protección de los sellos.

Para la fundación en aluviones, aguas abajo de la presa, la fundación de los materiales 3B, 3C y 3D es ubicada directamente sobre la superficie del aluvión, en el cauce del río, o sobre la roca alterada, en los estribos, después de la remoción de los materiales superficiales considerados inadecuados. La superficie del aluvión remanente es compactada por medio de pasadas de rodillo vibratorio tipo hexagonal.

En los estribos, la preparación de la cimentación de la presa se realizó por medio de la remoción de capas de suelo o bloques de roca inestables, concreto dental o concreto lanzado y cubierta por medio de material de filtro 2A.

Para la fundación del Plinto se distingue dos zonas: la del cauce de la quebrada y la de las laderas. En la primera es construida una pantalla plástica con profundidad variable, hasta que se alcance empotramiento en roca madre. En las laderas el proyecto final del plinto requirió el levantamiento topográfico de detalle de la geometría final de las excavaciones.

La fundación del plinto en los estribos se realizará sobre roca alterada, debido a que los esfuerzos a los que es sometido no son grandes. Sin embargo, se realizó una anchura suficientemente grande para impedir la erosión del material de fundación. El diseño considera que la roca de fundación debe cumplir con RMR~40.

3.5. Taludes externos y estabilidad

Para taludes externos, el diseño contempla ángulos de fricción variables en función de la presión normal, estableciéndose entre 38° y 50° , con base en el trabajo de Thomas Leps y las investigaciones efectuadas para las presas de Pinzandarán (México) y Pichi Picún Leufú (Argentina). En esos proyectos se utilizaron gravas arenosas muy similares a las de Palo Redondo y están ubicadas en regiones de elevada sismicidad.

Con base de estos datos y en la experiencia del diseñador de presas de gravas naturales en regiones sísmicas como la de Palo Redondo, ya construidas y en operación, fueron adoptados taludes externos con inclinaciones globales de

1V:1.5H aguas arriba y un talud medio de 1V:1.6H aguas abajo, considerando el acceso.

3.6. Losa de concreto

La losa de concreto en el cauce de la quebrada tiene espesor entre 0.30 m y 0.50m, definidos por medio de la ecuación siguiente obtenida en "Barragens de enrocamento com face de concreto - Paulo Cruz, Bayardo Materón y Manoel Freitas".

$$e = 0.30 + 0.0022 * H, \text{ para } H < 100\text{m}$$

Donde:

e = espesor de la losa (m)

H= La elevación de la losa en el punto del cálculo del espesor.

La losa de la presa tiene diseño de paneles de 15m de ancho y será construida por medio de encofrado deslizante.

El acero de refuerzo será definido con el criterio de 0.35% de la sección de concreto en el sentido horizontal y 0.4% en el sentido vertical de las losas, siendo estos criterios ser más detallados para las zonas de arranques de las losas junto al plinto.

3.7. Bordillo Extrusado

Está previsto el uso de un bordillo de concreto extrusado para proteger el material 2B y uniformizar el paramento aguas arriba antes de la ejecución de la cara de concreto. Esta estructura consiste en bloques de forma trapezoidal con dimensiones que otorguen al paramento de aguas arriba la pendiente y uniformidad de superficie para recibir la cara de concreto.

Para la construcción de los bloques resulta necesario utilizar un molde que tenga la misma inclinación que la cara de aguas arriba 1.5 H: 1 V y los extrude con una altura de 30cm, es decir de la misma de las capas de material 2B.

3.8. Parapeto

La altura del muro parapeto de la presa es de 4m, fue definida de acuerdo a la referencia: "Considerations on the seismic design of high concrete face rockfill dams (CFRDs) - Bayardo Materón y Gabriel Fernandez". El texto sugiere que

la altura para parapetos sea limitada de 3 a 4 metros. Hasta la elevación 347 msnm, el parapeto debe estar lleno de material 3B. En cotas superiores a la elevación 347 msnm. el parapeto sigue sin relleno sirviendo como barrera de seguridad para vehículos hasta la elevación 348 msnm.

3.9. Instrumentación

Para el control del comportamiento de las estructuras de la Presa Palo Redondo está prevista la instalación de sistemas de instrumentación en la presa. El objetivo es registrar el comportamiento local y global de las estructuras mediante la medición de desplazamientos verticales y horizontales, asentamientos, infiltraciones, valores de subpresión, etc.

Los parámetros a monitorear en la presa son los siguientes:

- Subpresiones en la cimentación mediante piezómetros.
- Desplazamientos por medio de juntómetros, extensómetros y medidor de desplazamientos tridireccionales.
- Deformaciones angulares en la cara de concreto con electro-niveles.
- Desplazamientos verticales mediante celdas y puntos topográficos de asentamiento.
- Infiltraciones mediante vertedor para medición de caudal.
- Aceleraciones generadas por movimientos telúricos registrados en el coronamiento de la presa y sobre roca firme fuera del área afectada por la obra.
- La definición final específica de los tipos de instrumentos que serán colocados en la presa se hará en el transcurso del desarrollo del Proyecto.

3.10. Juntas y Sellos

Tanto en la junta entre el plinto y las losas, llamada junta perimetral, como en las juntas entre paneles de concreto de la cara de concreto, llamadas juntas verticales, serán colocados sellos para impedir la infiltración de agua.

La junta perimetral deberá recibir sellos dobles de cobre en la base de la losa, debidamente embebida en la "cabeza" del plinto y apoyada en una placa de mortero con una protección de polivinil, y un sello constituido de una capa

externa de caucho reforzado, y de un relleno de mastique tipo Igás o material fino sin cohesión.

La junta perimetral se realiza en el taller con la finalidad que sea ensamblada o unida en campo para la colocación con el plinto y cara de concreto.

La banda de polivinil tiene un acabado liso tiene por finalidad absorber cualquier irregularidad del bordillo, esta debe ser colocada adecuadamente con la finalidad que la lámina de cobre quede alineada y no sufra ningún efecto de punzonamiento.

El bulbo de neopreno tiene una sección rectangular en tres caras y una semicircular. Las dimensiones tienen que guardar relación con bulbo del sello inferior de cobre. El neopreno se coloca en todos los sellos de cobre, interiormente y bajo el bulbo del sello.

Los sellos de las juntas verticales son similares al de la junta perimetral, en aquellas entre losas que deben abrir (juntas de tensión), ubicadas en los estribos, siendo siete (7) en el estribo izquierdo y catorce (14) en el derecho.

En las juntas verticales restantes, que sufren compresión, se instala el sello de cobre, eliminándose la protección de caucho y mastique. En las cinco (5) juntas centrales, donde la compresión es mayor, se colocan placas de madera blanda para reducir presiones eventuales de compresión. Sin embargo, este problema no es de ocurrencia probable en Palo Redondo, debido al ancho de la presa y a los módulos de deformación elevados de la grava compactada.

3.11. Plinto

El plinto es la estructura de concreto que conecta la losa a la fundación. Es una estructura “flotante” sobre el cauce de la quebrada Palo Redondo y cimentado en roca con RMR mayor o igual a 40 en los estribos.

Debido a la alta permeabilidad del aluvión en la base del plinto, fue prevista una pantalla plástica empotrada en la roca. El murete guía de la pantalla fue ejecutado a una distancia de 9m de la losa y la conexión entre los dos es por un plinto articulado.

La concepción del plinto articulado con 3 losas de 3m en el lecho del río, permite construirse al mini-plinto independientemente de la construcción de la pared diafragma vertical.

En los estribos, se ha previsto 6.15m como losa externa, para ubicar las inyecciones (1 línea central y 2 de consolidación) y el restante como plinto interno, de acuerdo a la carga hidráulica y la calidad de la cimentación.

3.12. Estudios de Filtración de la Presa y Estabilidad

3.12.1. Filtración

El análisis de filtración se realizó considerando que la presa es compuesta por gravas naturales compactadas del tipo CFRD con altura de 97m, siendo las losas conectadas en el cauce de la quebrada por un plinto flotante y pared diafragma, y en los estribos por plinto convencional. El NAMO (Nivel de Agua Máxima de Operación) es la cota 344 msnm, es decir a 94 m desde el plinto del cauce de quebrada.

La impermeabilización de la presa está constituida por los siguientes elementos:

- Paneles de losas de concreto reforzado conectadas al plinto por medio de un sistema de juntas diseñadas para soportar las presiones del embalse.
- El aluvión y roca alterada de la quebrada es cortado por una pared diafragma plástica complementada por una pantalla de impermeabilización bajo el plinto.
- El tratamiento de los estribos es configurado por una pantalla de inyección (una línea central de impermeabilización y dos líneas de consolidación) bajo el plinto.

Además de los elementos citados, los materiales 1A, 2A y 2B, normalmente empleados en este tipo de presa también actúan como líneas de defensas adicionales contra filtraciones.

La presa de Palo Redondo se apoya en el cauce de la quebrada en un espesor variable de aluvión llegando hasta 20m de profundidad. En la margen derecha se apoya en la Formación Chicama, constituidas por lutitas, limolitas,

areniscas e intrusiones alternadas de material andesítico y en la margen izquierda en rocas volcánicas andesíticas del Grupo Casma.

Para la investigación de permeabilidad de la cimentación de la presa, se realizaron sondeos y pozos con ensayos de pérdida de agua presentados en el Cuadro 2.

Cuadro N° 2. Materiales del relleno de la Presa.

Sondeo	N	E	Inclinación con la vertical (°)	Cota (m)	Longitud perforada (m)	Espesor vertical de suelo (m)	Espesor vertical de roca alterada (m)	Espesor vertical de roca sana (m)	Tramo ensayado	Coefficiente de permeabilidad
SD-01	774595	9035330	30	357.3	43.47	0	9.57	33.90	4.80 – 15.00	1×10^{-3}
									17.00 – 20.00	5×10^{-4}
									20.10 – 29.90	1×10^{-4}
									30.10 – 40.00	5×10^{-5}
									40.00 – 45.00	1×10^{-4}
									45.20 – 50.20	5×10^{-5}
SD-03	774625	9035470	30	275	52.31	0	7.32	44,99	9.80 – 10.00	1×10^{-3}
									11.05 – 15.05	1×10^{-4}
									15.05 – 20.05	5×10^{-5}
									20.00 – 30.00	5×10^{-4}
									40.00 – 30.00	1×10^{-4}
									40.00 – 45.00	5×10^{-4}

Fuente: Ingeniería de detalle. Expediente Técnico 1. Presa Palo Redondo.

Las permeabilidades resultantes de los sondeos fueron clasificadas según cinco clases tal como se muestra en la Figura 4.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA				
GRADO	DENOMINACIÓN	PERDIDA DE AGUA ESPECIFICA (l/min/m/kg/cm ²)	COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD "K" (cm/s)	
H1	MUY BAJA	< 0,1	$K < 1 \times 10^{-5}$	
H2	BAJA	0,1 - 1	$1 \times 10^{-5} \leq K < 1 \times 10^{-4}$	
H3	MEDIA	1 - 5	$1 \times 10^{-4} \leq K < 5 \times 10^{-4}$	
H4	ALTA	5 - 10	$5 \times 10^{-4} \leq K < 1 \times 10^{-3}$	
H5	MUY ALTA	> 10	$K > 1 \times 10^{-3}$	

Figura 4. Clase de permeabilidad adoptadas

Fuente: Ingeniería de detalle. Expediente Técnico 1, Presa Palo Redondo.

En el análisis de filtración, para el aluvión, macizo de roca alterada y roca firme se adopta los parámetros presentados en el Cuadro 3.

Cuadro N° 3. Valores de los Coeficientes de Permeabilidad del aluvial y concreto.

Material	Coeficiente de Permeabilidad k (cm/s)
Aluvión	1×10^{-2}
Enrocamiento	1×10^{-2}
Roca Alterada	1×10^{-3}
Roca Firme	1×10^{-6}
Pared Diafragma Plástica	1×10^{-6}
Concreto	1×10^{-8}

Fuente: Ingeniería de detalle. Expediente Técnico 1. Presa Palo Redondo.

Se consideró para el área influenciada por la pantalla de inyecciones, una reducción del coeficiente de permeabilidad de 10 veces a la del macizo rocoso.

La permeabilidad de los materiales del relleno y cimentación, de acuerdo a las investigaciones y a las pruebas son los que se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro N° 4. Valores de los Coeficientes de Permeabilidad del relleno y concreto.

N°	MATERIAL	K (cm/s)
1	1A	1×10^{-3}
2	1B	3×10^{-3}
3	2A	1×10^{-4}
4	2B	1.4×10^{-3}
5	3B	1.2×10^{-2}
6	3C	1.8×10^{-2}
7	3D	1×10^{-2}
8	PARAPETO	1×10^{-8}
9	CARA DE CONCRETO	1×10^{-8}
10	PLINTO	1×10^{-8}
11	PANTALLA PLÁSTICA	1×10^{-7}
12	ALUVIAL	1×10^{-2}
13	ROCA ALTERADA	1×10^{-3}
14	ROCA MADRE	1×10^{-6}

Fuente: Ingeniería de detalle. Expediente Técnico 1 y pruebas de campo. Presa Palo Redondo.

3.12.2. Estabilidad de taludes

Los análisis de estabilidad de la presa fueron realizados para tres tipos de cargas diferentes:

- Final de construcción

Esta condición de análisis simula una situación en la que el cuerpo de la presa se encuentra construido, así como la losa de concreto no está ejecutada.

- Régimen Permanente / Operación

En esta condición de análisis se verifica la estabilidad del talud de aguas abajo considerando que la presa se encuentra en pleno funcionamiento con el nivel de agua normal en la elevación 344.00 msnm.

- Régimen Permanente / Operación

En esta condición de análisis se verifica la estabilidad del talud de aguas abajo considerando que la presa se encuentra en pleno funcionamiento con el nivel de agua normal en la elevación 344 msnm.

Los factores de seguridad considerados en el diseño de la presa han sido obtenidos del cuerpo de ingenieros de Estados Unidos en el diseño de presa de materiales sueltos (USACE, 2004), y son lo que se muestran en el Cuadro N° 5.

Cuadro N° 5. Factores de seguridad de condiciones de carga.

Ítem	Condiciones de Carga	Factores de Seguridad Requeridos
1	Final de construcción – aguas arriba	1.3
2	Final de Construcción – aguas abajo	1.3
3	Condición de Operación – aguas abajo	1.5
4	Llenado rápido – aguas arriba	1.1
	Desembalse rápido – aguas abajo	1.3

Fuente: Ingeniería de detalle, Expediente Técnico 1.Presa Palo Redondo.

Las propiedades de los materiales del relleno y cimentación, de acuerdo a las investigaciones y a las pruebas son los que se muestran en el Cuadro N° 6.

Cuadro N° 6. Valores de las propiedades de los materiales de relleno y cimentación.

N°	MATERIAL	Elastic Modulus E (kN/m ²)	Poison	Unit Weigth γ (Kn/m ³)	Initial Void Ratio (eo)	Cohesión (C) kN/m ²	Friccion angle ϕ (°)
1	1A	16000	0.3	19	0.5	0	35
2	1B	120000	0.35	19	0.5	0	40
3	2A	16000	0.3	19	0.5	0	35

N°	MATERIAL	Elastic Modulus E (kN/m ²)	Poisson	Unit Weigth γ (Kn/m ³)	Initial Void Ratio (eo)	Cohesión (C) kN/m ²	Friccion angle ϕ (°)
4	2B	16000	0.3	20	0.5	0	38
5	3B	126000	0.35	21	0.5	0	39
6	3C	142000	0.35	21	0.5	0	39
7	3D	52000	0.35	22	0.5	0	39
8	PARAPETO	21000000	0.2	25	0.5	15	35
9	CARA DE CONCRETO	21000000	0.2	25	0.5	15	35
10	PLINTO	21000000	0.2	25	0.5	15	35
11	PANTALLA PLÁSTICA	24000000	0.3	15	0.5	30	36
12	ALUVIAL	360000	0.35	20	0.5	0	35
13	ROCA ALTERADA	1000000	0.3	22	0.5	60	39
14	ROCA MADRE	2000000	0.2	23	0.5	100	43

Fuente: Ingeniería de detalle. Expediente Técnico 1 y datos de los materiales. Presa Palo Redondo.

Las propiedades físicas y mecánicas de los materiales del relleno de presa de acuerdo a las pruebas son los que se muestran en el Cuadro N° 7.

Cuadro N° 7. Valores de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de relleno de presa.

N°	Material	Densidad Seca (g/cm ³)	Índice de Vacíos	Abrasión (%)	Densidad Relativa (%)
1	2A	2.08	-	15.62	93
2	2B	2.29	-	12.05	91.71
3	3B	2.35	0.18	11.8	-
4	3C	2.33	0.19	11.76	-

Fuente: Ingeniería de detalle. Expediente Técnico 1. Presa Palo Redondo.

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA EMPLEADA

4.1 Tipo y nivel de investigación

El tipo de investigación es el explicativo (cuantitativo) pues analiza los materiales del relleno de la presa Palo Redondo para simular el comportamiento de la filtración en el cuerpo de la presa.

El nivel de investigación es aplicado a través de los resultados obtenidos se propone acciones para cautelar el nivel de seguridad de la presa.

Las técnicas que se utilizó son la documental y la recopilación de datos. La primera es a través de una revisión sistemática de información, para lo cual se efectuó la recopilación ordenada de información relativa a estudios e investigaciones sobre las filtraciones en presas CFRD. La segunda técnica fue a través de la recopilación de datos de pruebas de campo de permeabilidad.

Un aspecto importante para la presente investigación es el modelamiento de filtraciones y estabilidad a través del software MIDAS GTS NX a través de un análisis acoplado. Para efectuar este proceso se sigue los pasos previstos para una modelación numérica. En ese sentido, teniendo los datos (inputs) geotécnicos y geométricos de la presa, se procedió a modelar con la finalidad de observar el comportamiento de la presa frente a diversos escenarios de construcción y operación.

4.2 Población y muestra de estudio

Población

La población para la investigación es única (presa) en el sentido que la evaluación de los materiales del relleno se realizó a la estructura de la presa Palo Redondo.

Muestra

Considerando la población es única, y que los materiales constitutivos para el relleno de presa se encuentran dentro de una faja granulométrica, para el análisis de filtración, la muestra correspondió sobre los ensayos cada 20,000m³ de acuerdo a lo requerido por el proyecto para los materiales 3C y cada 5,000m³ para material 3C. Para el aluvión, enrocamiento, roca alterada,

roca firme, pared diafragma y concreto se utilizó una muestra por cada material debido a su uniformidad de coeficiente de permeabilidad.

Para el caso del análisis de estabilidad de taludes, la muestra fue los resultados obtenidos de los estudios del terraplén de pruebas de la presa.

4.3 Diseño de Investigación

La investigación es de tipo explicativo cuantitativo del nivel aplicado. En ese sentido, con la finalidad de lograr el objetivo planteado, se siguió la secuencia lógica descrita a continuación.

4.3.1 Revisión documental

A través de la técnica de revisión documental a través de artículos y libros relacionados filtraciones en presas CFRD se conoce los aspectos técnicos necesarios para diseñar una presa segura a riesgo de filtraciones y estabilidad. En ese sentido, los parámetros obtenidos y las recomendaciones dadas, se contrastó con los parámetros de diseño de la presa Palo Redondo en el análisis y evaluación en el cumplimiento de las recomendaciones internacionales en los diseños de presas CFRD.

4.3.2 Revisión de los estudios de la Presa Palo Redondo

Siguiendo la secuencia de la investigación, se recopiló los datos de los parámetros geométricos y geotécnicos de la presa Palo Redondo para proceder a analizar las filtraciones y la estabilidad de la presa.

4.3.3 Modelamiento de filtración y estabilidad

Contando con la geometría de la presa dibujada en el software AutoCAD, en extensión .dxf se importó desde el programa de MIDAS GTS NX para obtener la geometría de la presa. Teniendo los parámetros geotécnicos de los materiales de presa se ingresó al programa MIDAS GTS NX para simular la filtración y la estabilidad.

Habiendo ingresado los parámetros geotécnicos al programa de MIDAS GTS NX, se calibró respecto a investigaciones similares; luego se procedió a establecer los escenarios para la filtración y estabilidad.

Los escenarios para el análisis de filtración son:

- a) Presa construida llena
- b) Llenado rápido y desembalse rápido
- c) Operación transitoria durante 1 año.

Los escenarios para el análisis de estabilidad son:

- a) Final de construcción – aguas arriba
- b) Final de Construcción – aguas abajo
- c) Condición de Operación – aguas abajo
- d) Llenado rápido y desembalse rápido

4.3.4 Discusión de resultados

Considerando la revisión documental se discute los resultados, analizando la consistencia y cumplimiento de los parámetros exigidos. De acuerdo a los resultados se proponen alternativas para amenorar el riesgo de filtraciones.

4.4 Técnicas e Instrumentos de investigación

Las técnicas utilizadas son el análisis documental de investigaciones sobre filtraciones de presas CFRD, y el registro de resultados de campo a través de las pruebas de permeabilidad y compactación que se realizan en el relleno de la presa.

4.5 Procesamiento y análisis de datos

De acuerdo a los datos de campo obtenido, se realizó la simulación de filtración y estabilidad de acuerdo a los escenarios establecidos.

4.5.1 Filtración

El análisis de Filtración fue realizado mediante el software MIDAS GTS NX de la empresa Simusolf de Corea del Sur. Se empleó el método de los elementos finitos, considerando el flujo en medios porosos y uniformes.

Teniendo en cuenta que la filtración ocurre de manera predominante por medios fracturados, y dada las simplificaciones de los modelos numéricos, los resultados de las filtraciones y estabilidad son de acuerdo a los parámetros y propiedades de los materiales del relleno de presa.

Se consideraron las cargas de aguas arriba el nivel de agua máximo normal de operación en la cota 344.00 msnm. y de aguas abajo el nivel de la fundación en la cota 250.00 msnm.

4.5.2 Estabilidad

Para el análisis se aplicó el método de equilibrio límite según el proceso de Spencer utilizándose el software MIDAS GTS NX² de la empresa Simusolf.

Para el modelamiento se utilizó los parámetros de materiales construidos en la presa.

En el Cuadro 8 se indica los parámetros geotécnicos de acuerdo a los materiales usados en la construcción de la Presa Palo Redondo.

Cuadro N° 8. Parámetros Geotécnicos.

Ítem	Material	Peso específico (kN/m ³)	Cohesión (kPa)	Ángulo de fricción (°)
1	1A — Limo y arena fina	19	0	35
2	1B — Randon	19	0	40
3	2A — Filtro de grava fina	19	0	35
3	2B — Transición de grava arenosa	20	0	38
4	3B — Grava arenosa bien graduada	21	0	39
5	3C — Grava arenosa bien graduada	21	0	39
6	3D — Grava gruesa seleccionada	22	0	39
7	Aluvión	20	0	35

Fuente: Ingeniería de detalle, Expediente Técnico 1. Presa Palo Redondo.

² <https://www.midasoft.com/es/latinoamerica/productos/ingenieriageotecnica/midasgtsnx>

CAPÍTULO V. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1. Resultados de Filtración

Los resultados de la filtración se presentan producto de la modelación numérica a través del programa MIDAS GTS NX. En la investigación se ha considerado 3 escenarios de análisis.

5.1.1. Presa construida llena

La mayor carga ocurre en la pantalla plástica, el gradiente de salida justo aguas abajo de la pantalla es el más elevado. El gradiente decrece inmediatamente aguas abajo del plinto.

La presión de poros se tiene en la zona aguas arriba de la pantalla plástica como se observa en la Figura 5.

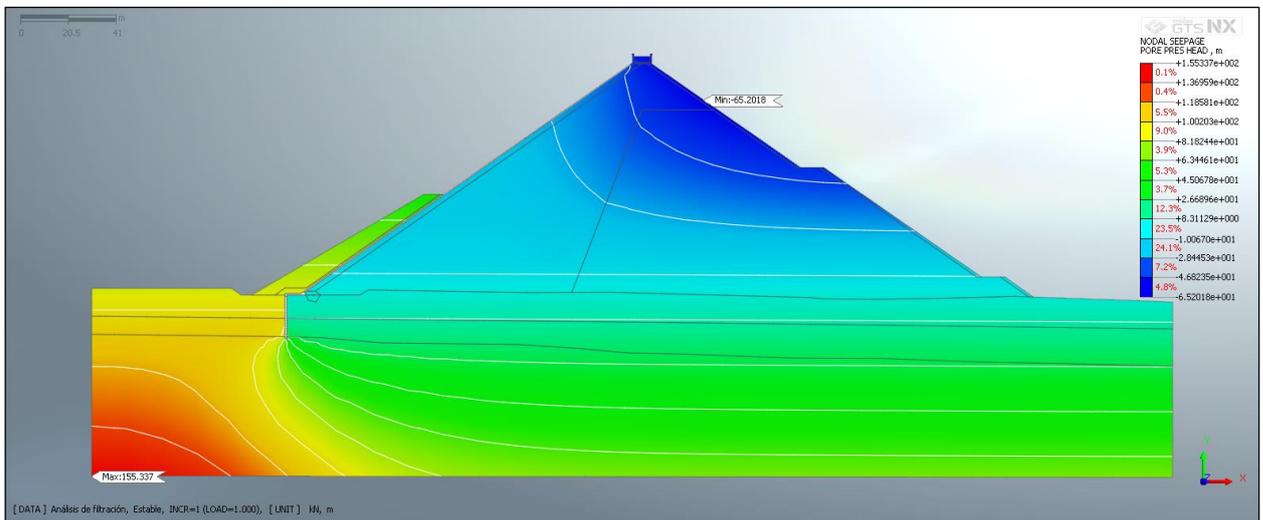


Figura 5. Presión de Poros.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

El gradiente hidráulico en la dirección X (simulación 2D) se encuentra en la zona del plinto y la Planta Plástica tal como se muestra en la Figura 6.

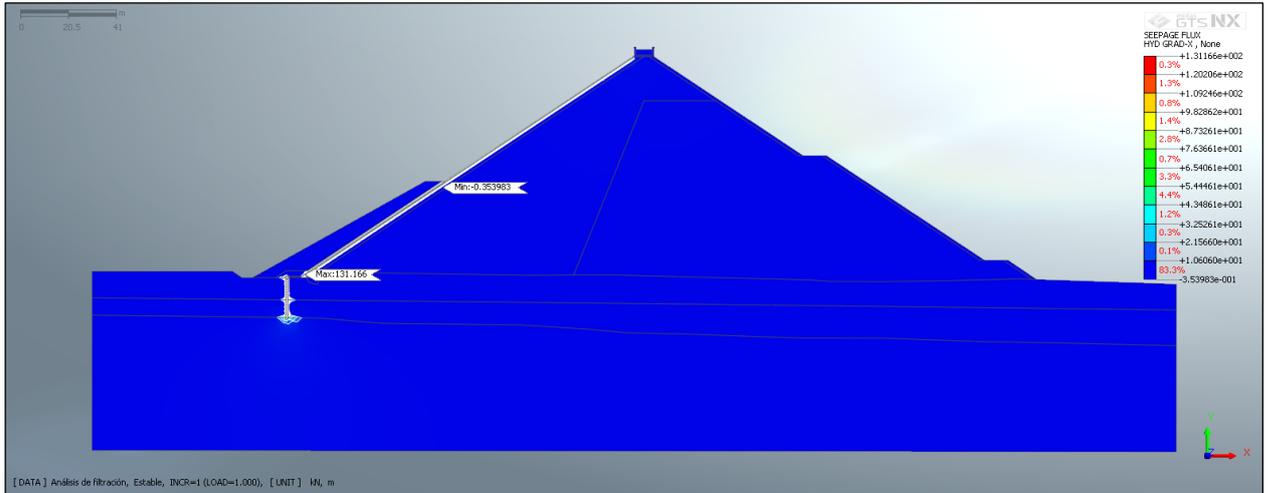


Figura 6. Gradiente Hidráulica (x).

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX

Las mayores velocidades de la filtración se presentan en la pantalla plástica y en la zona aguas abajo de la presa en el aluvial, siendo la zona del aluvial por su alta permeabilidad por donde se tiene las mayores velocidades resultantes del flujo de filtración como se muestra en la Figura 7.

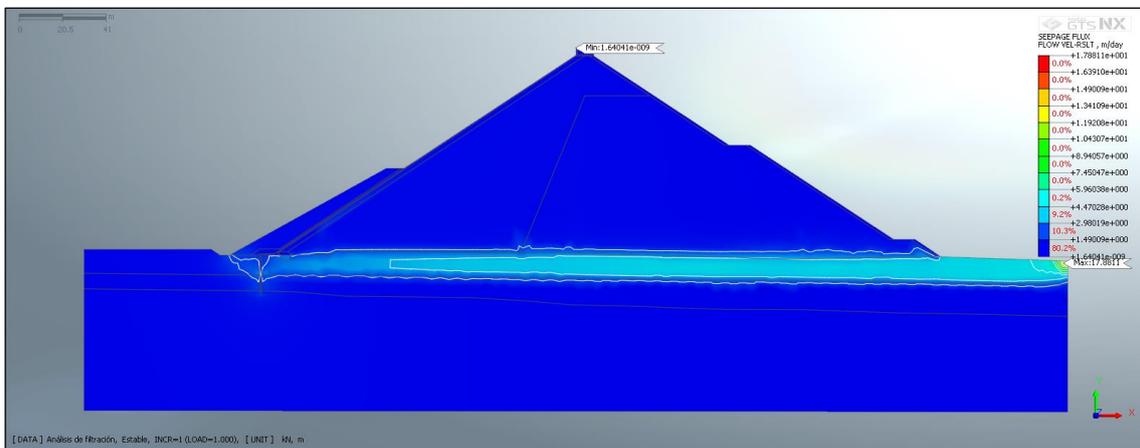


Figura 7. Velocidad de Flujo Resultante.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

La línea de flujo de filtración del escenario se muestra en la Figura 8.

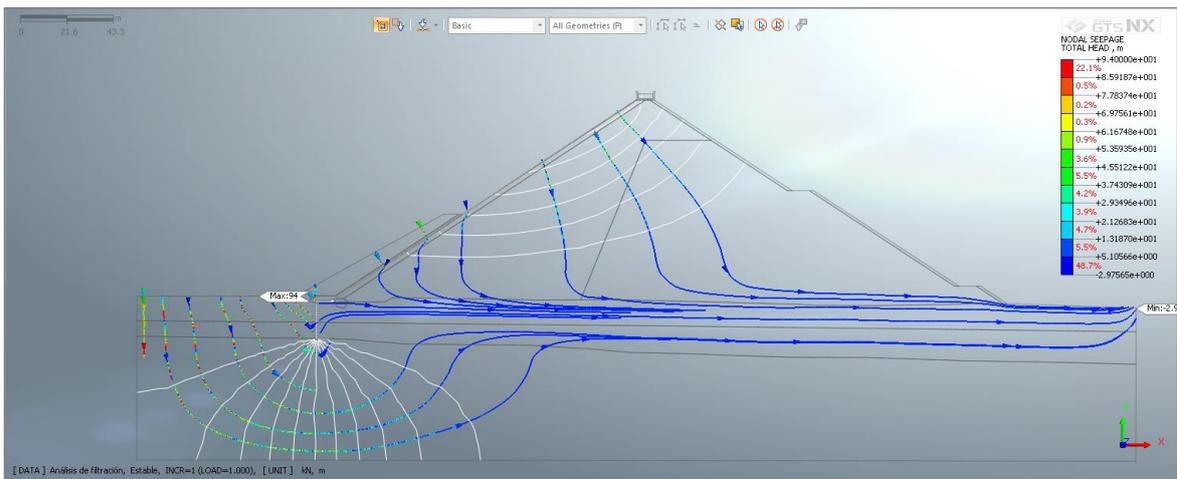


Figura 8. Líneas de Flujo de Filtración.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

En este escenario se obtiene la mayor filtración, siendo en la sección de la presa, de acuerdo al cálculo del programa se obtiene un caudal de filtración de 53.15 m³/día tal como se muestra en la Figura 9.

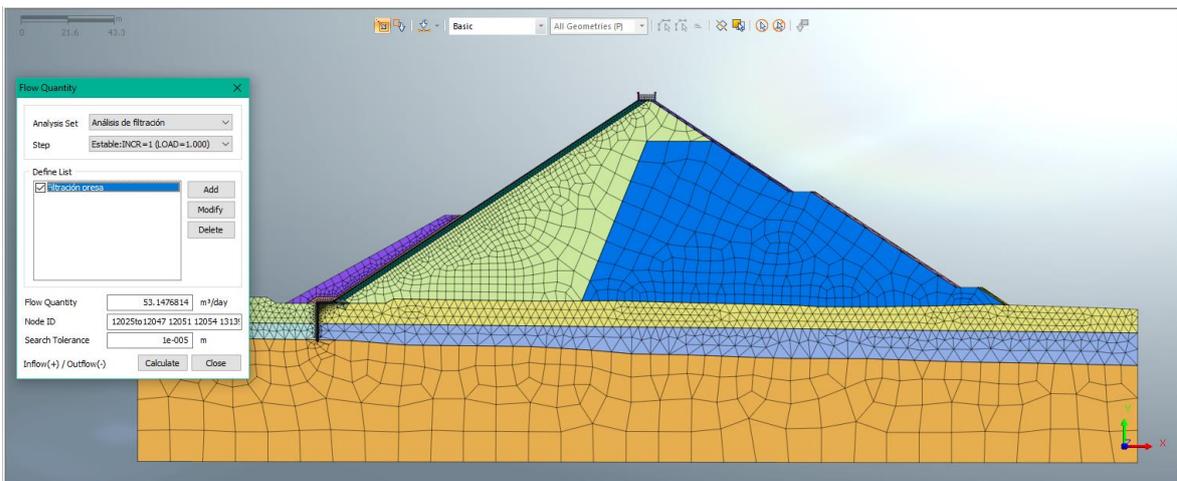


Figura 9. Caudal de Filtración por día.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

5.1.2. Llenado y desembalse rápido

El escenario de llenado rápido considera la máxima derivación del canal madre hacia la presa, descontando la derivación (75m³/s) para la atención de la demanda (25m³/s) de las Etapa I y II del PECH. En ese sentido, el mayor llenado rápido se realiza en 94 días, siempre que exista condiciones hidrológicas favorables en el río Santa. La mayor carga ocurre cuando se

llena la presa en su cota 344msnm. La presión de poros para el llenado rápido aumenta en la medida incrementa la altura de agua hasta alcanzar la altura den NAMO (94m).

En el desembalse rápido se obtiene a través de la descarga máxima de túnel de aducción (78 m³/s) hasta la cota necesaria de operación (302msnm) para la derivación de la demanda de la I y II Etapa PECH. El desembalse se logra en 47 días. Esta situación impacta en la presión de poros en la zona de la cara de concreto que no cuenta con el material 1A y 1B, tal como se observa en la Figura 10.

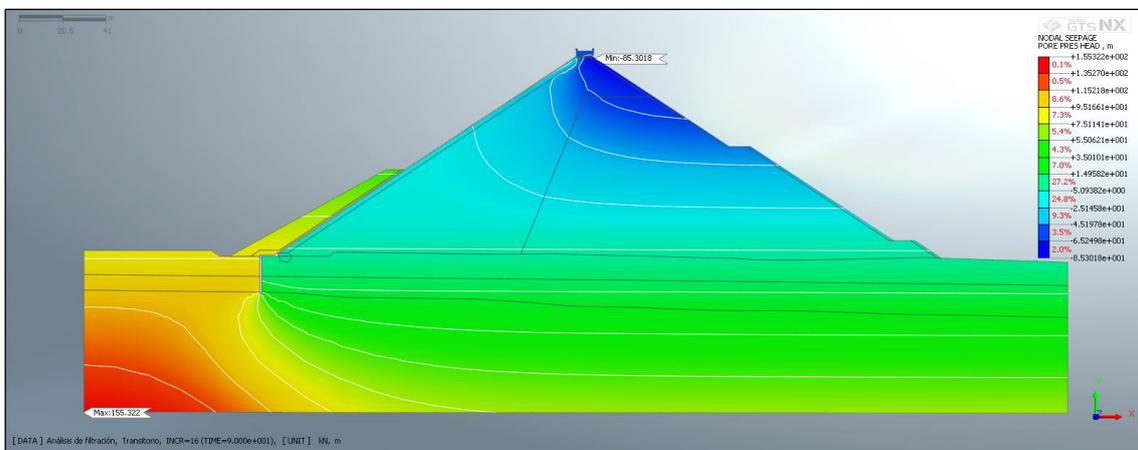


Figura 10. Presión de Poros.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

El gradiente hidráulico en la dirección X (simulación 2D) se encuentra en la zona del plinto y la Planta Plástica tal como se muestra en la Figura 11.

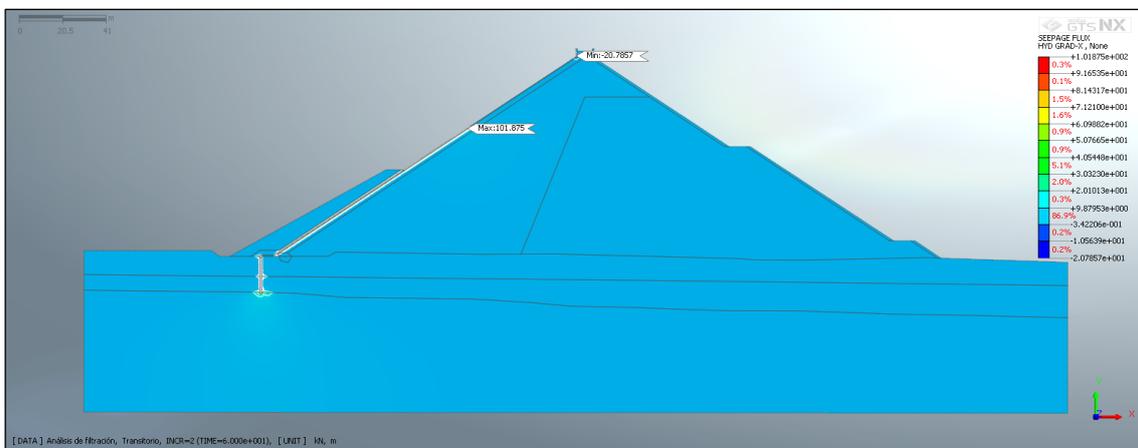


Figura 11. Gradiente Hidráulica (x).

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

En la zona del aluvial se ubica las mayores velocidades resultantes de la filtración tal como se muestra en la Figura 12.

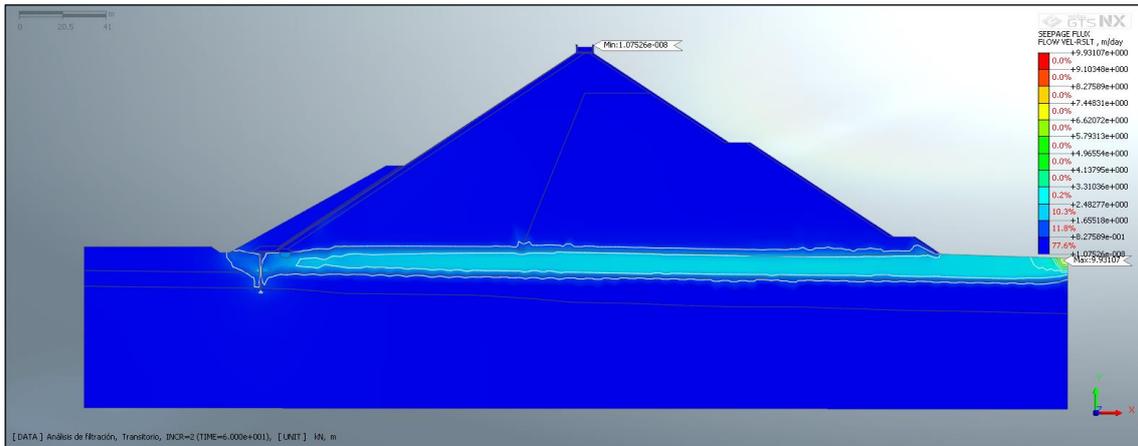


Figura 12. Velocidad de Flujo Resultante.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

La línea de flujo de filtración del escenario se muestra en la Figura 13.

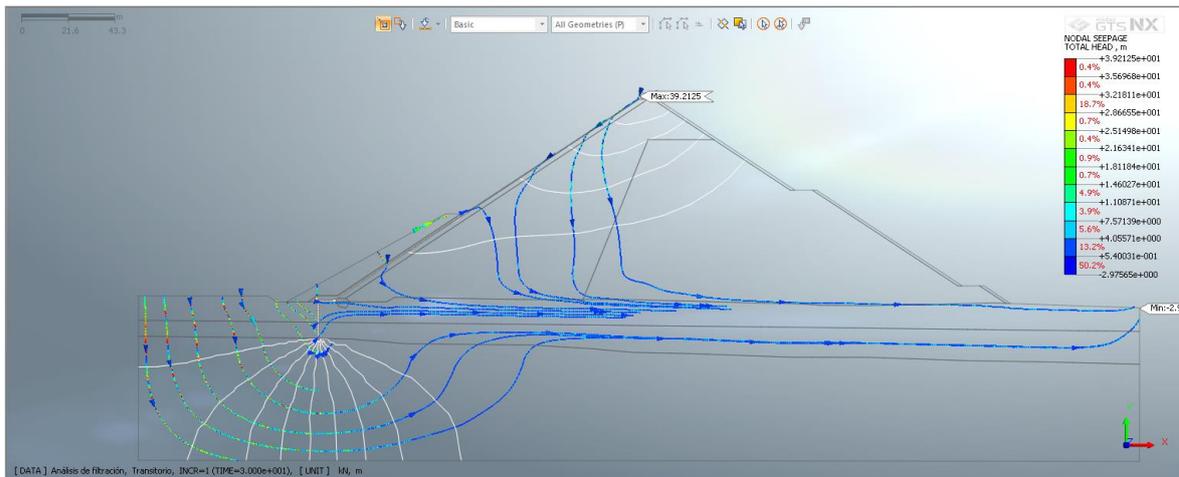


Figura 13. Líneas de Flujo de Filtración.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

En este escenario las filtraciones son menores al escenario de presa llena, la mayor filtración se obtiene en el desembalse rápido al partir de una mayor cota. De acuerdo al cálculo del programa en la cota 302 msnm se tiene un caudal de filtración de 36.92 m³/día tal como se muestra en la Figura 14.

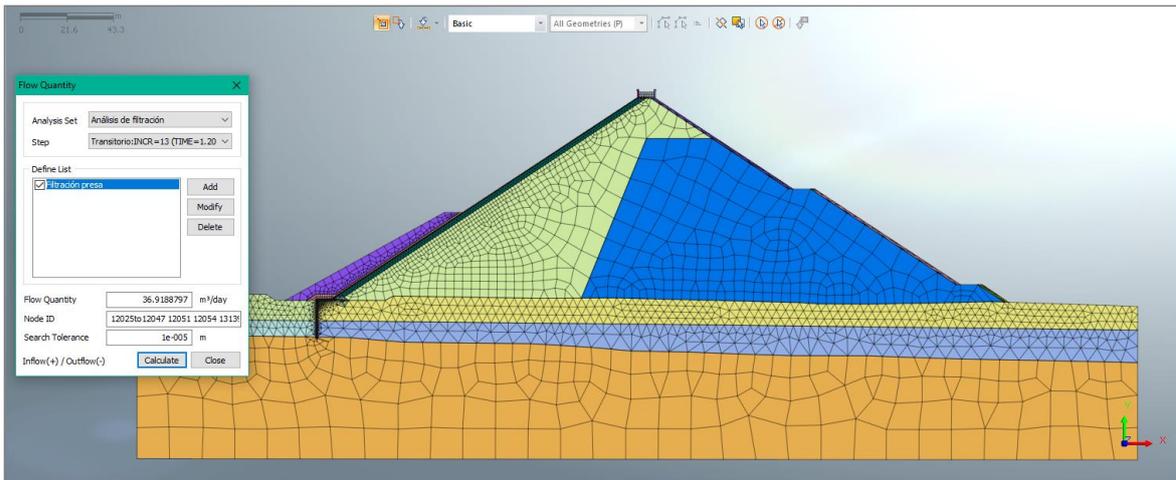


Figura 14. Caudal de Filtración Desembalse Rápido.
Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

5.1.3. Operación de Presa

El escenario de operación de la presa considera un estado transitorio del nivel del agua en la presa durante un año de operación. Esta situación no impacta de manera significativa en la presión de poros en la zona de la cara de concreto respecto a los escenarios antes mostrados. La presión de poros es similar al estado de llenado total de la presa, tal como se observa en la Figura 15.

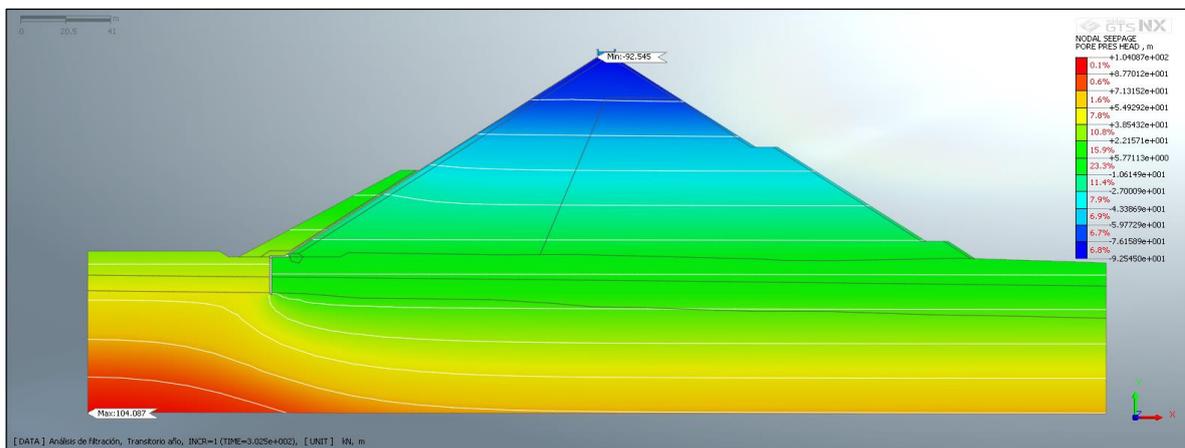


Figura 15. Presión de Poros.
Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

El gradiente hidráulico en la dirección X (simulación 2D) se encuentra en la zona del plinto y la Planta Plástica tal como se muestra en la Figura 16.

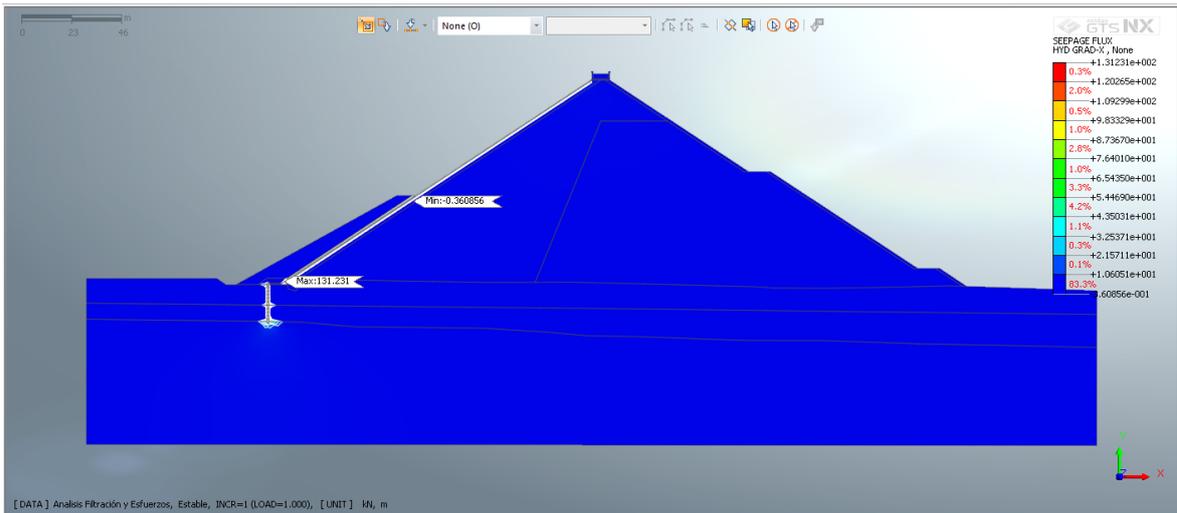


Figura 16. Gradiente Hidráulica (x).

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

En la zona del aluvial se ubica las mayores velocidades resultantes de la filtración, y es mayor a los escenarios anteriores, tal como se muestra en la Figura 17.

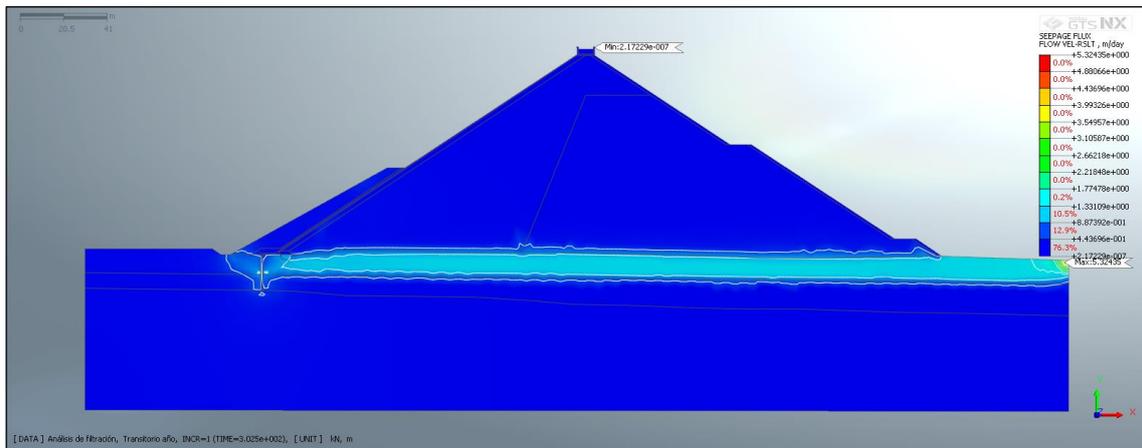


Figura 17. Velocidad de Flujo Resultante.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

Las líneas de flujo de filtración des escenario se muestra en la Figura 18.

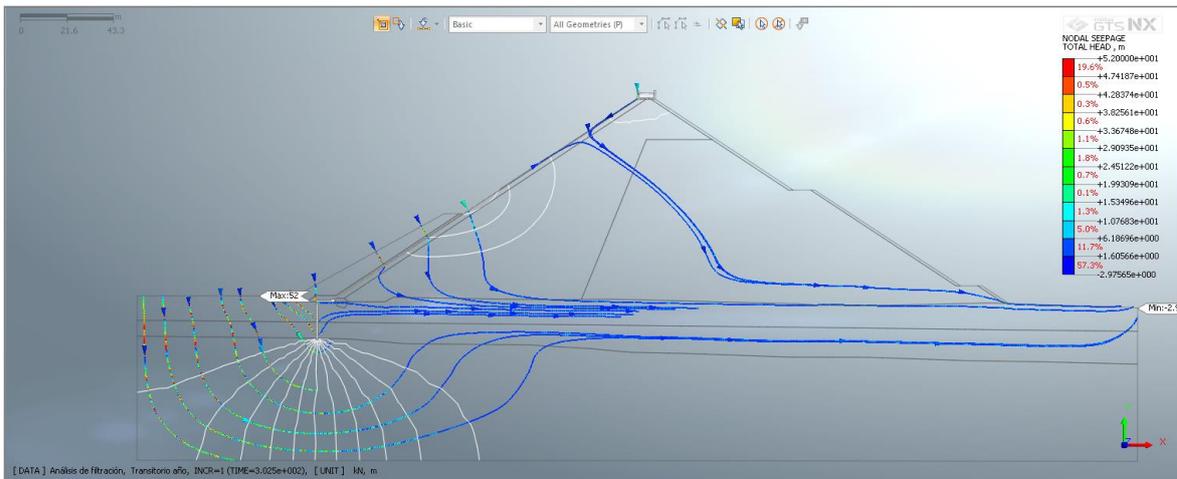


Figura 18. Líneas de Flujo de Filtración.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

En este escenario las filtraciones son menores al escenario de presa llena, de acuerdo al cálculo del programa se tiene un caudal de filtración de 14.86 m³/día tal como se muestra en la Figura 19.

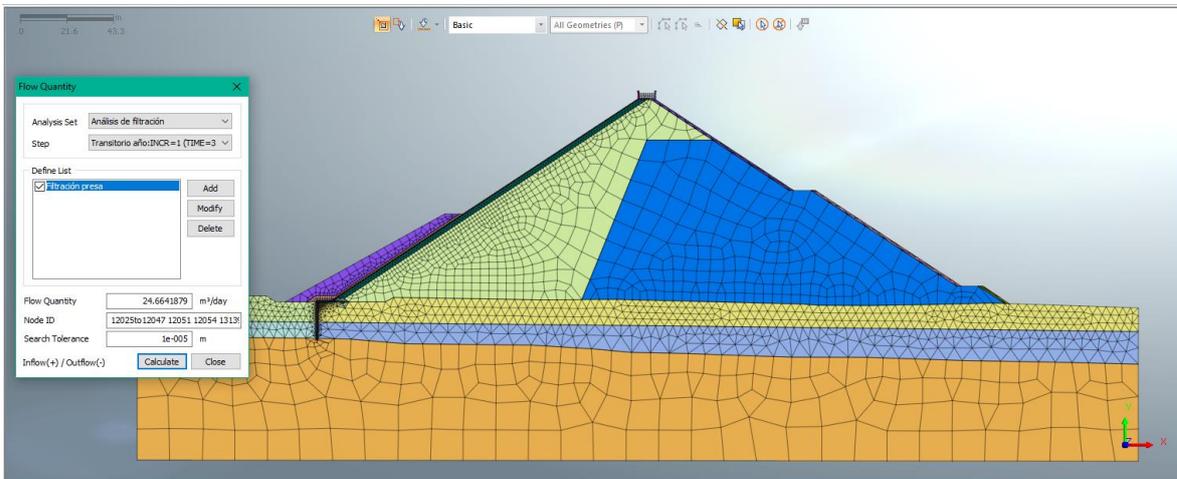


Figura 19. Caudal de Filtración estado transitorio en 1 año.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

Los valores obtenidos de la simulación de los escenarios anteriores reflejan las condiciones y parámetros utilizados en el diseño de la presa, esto podría diferir de las condiciones de campo en la medida que varíen en la construcción final de la obra que se encuentra paralizada desde diciembre de 2016.

5.2. Resultados Estabilidad

Los resultados respecto a las condiciones previstas para el estudio, se obtuvieron factores de seguridad mínimos exigidos, por cuanto la estructura es segura en las condiciones analizadas.

En el Cuadro 9 se muestra los resultados del análisis de estabilidad de la presa Palo Redondo para los escenarios determinados en la investigación.

Cuadro N° 9. Resultados de Análisis de Estabilidad.

Ítem	Condiciones de Carga	Factores de Seguridad Requeridos	Factores de Seguridad Obtenidos
1	Final de Construcción – aguas arriba	1.3	1.64
2	Final de Construcción – aguas abajo	1.3	1.82
3	Condición de Operación – aguas abajo	1.5	1.92
4	Llenado Rápido – aguas abajo	1.1	1.11
	Desembalse rápido – aguas arriba	1.3	1.32

Fuente: Resultado de simulación de estabilidad de la presa Palo Redondo.

De acuerdo a los parámetros medidos en campo y adoptados, se tiene que la presa en estudio presenta materiales que brindan factores de seguridad mayores a los mínimos requeridos, garantizando la estabilidad de los taludes aguas arriba y abajo de la presa Palo Redondo en los escenarios estudiados.

El detalle de los resultados de los escenarios se muestra a continuación.

5.2.1. Presa construida sin operación

En este escenario no presenta desplazamientos, es decir la presa es estable como se muestra en la Figura 20.

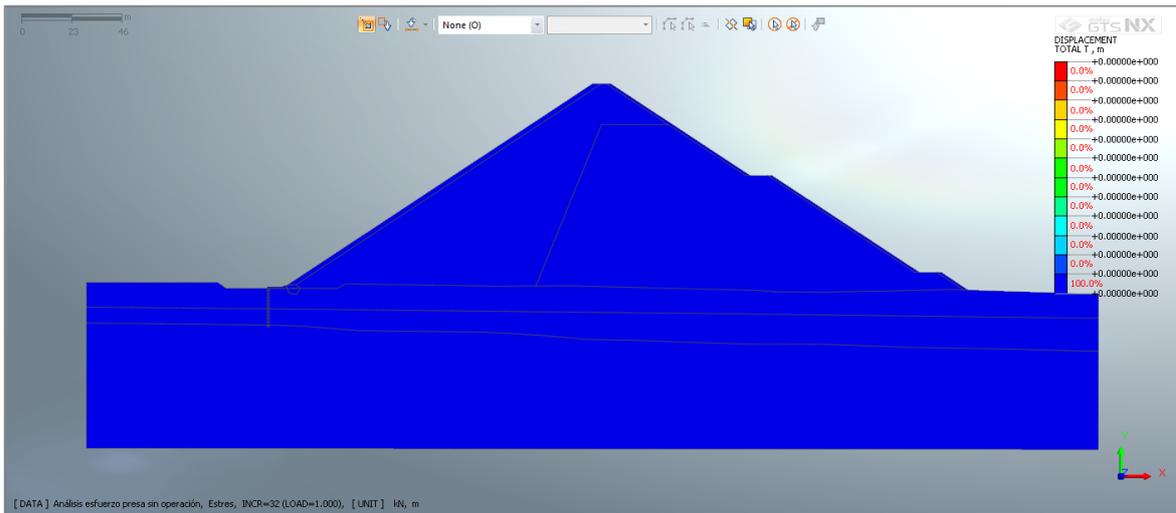


Figura 20. Desplazamiento de la presa.
 Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

Los esfuerzos se presentan en el eje y de la presa debido al peso propio, tal como se muestra en la Figura 21.

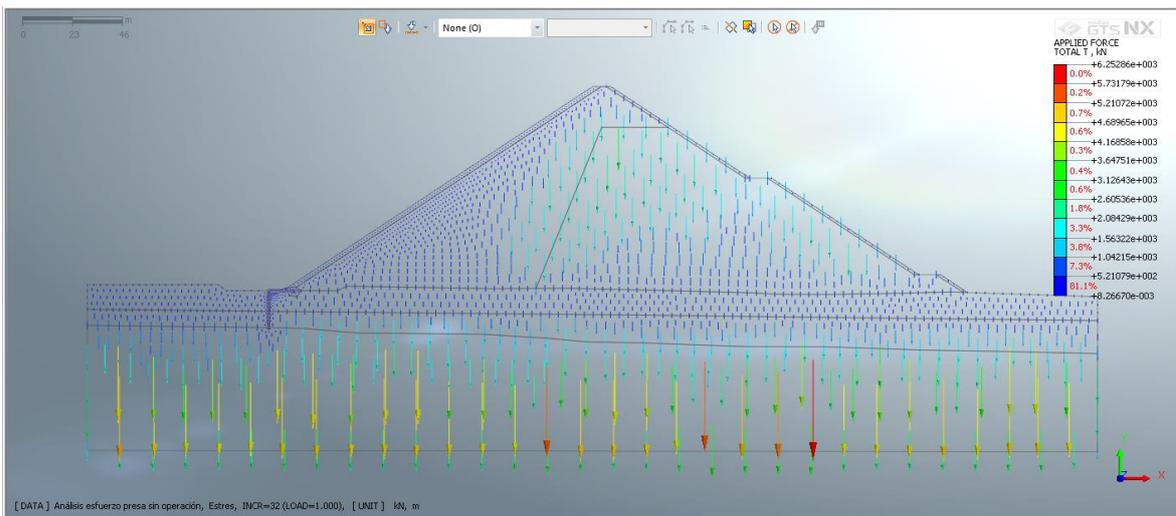


Figura 21. Esfuerzo total de la presa.
 Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

5.2.2. Presa construida en operación

En este escenario no presenta importantes desplazamientos, en la zona del plinto hay un desplazamiento mínimo sin ser significativo, es decir la presa es estable como se muestra en la Figura 22.

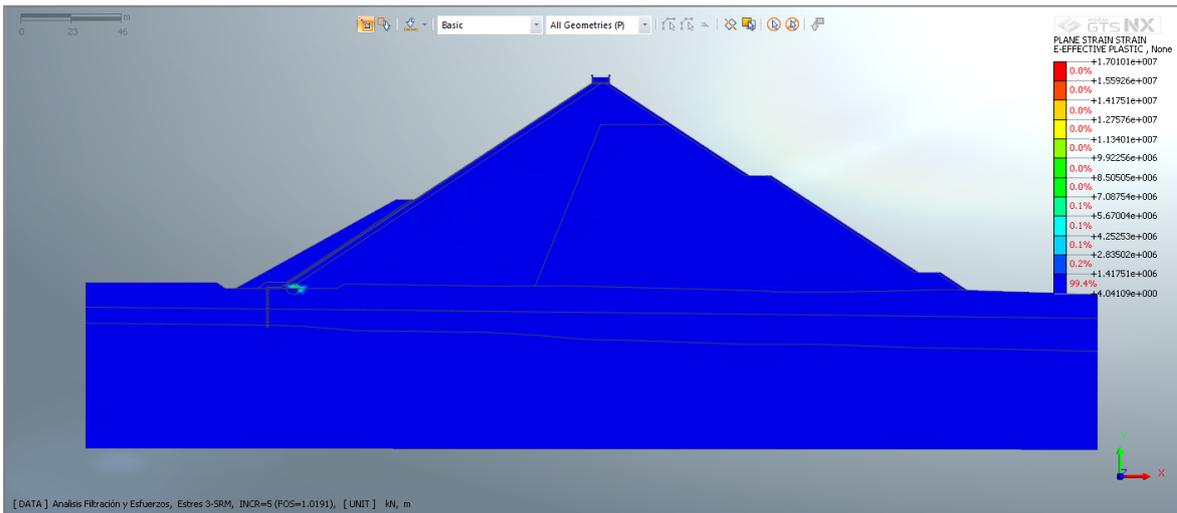


Figura 22. Desplazamiento de la presa.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

Los mayores esfuerzos se presentan en la zona de la roca madre aguas arriba de la pantalla plástica, tal como se muestra en la Figura 23.

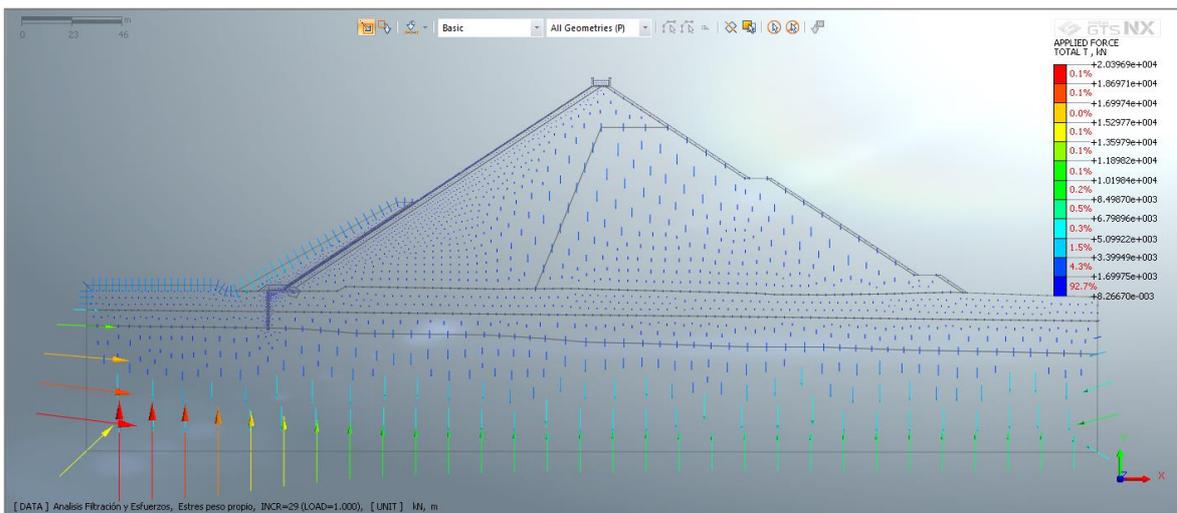


Figura 23. Esfuerzo total de la presa.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

5.2.3. Llenado y desembalse rápido

En este escenario, al igual que el anterior, no presenta importantes desplazamientos, en la zona del plinto hay un desplazamiento mínimo sin ser significativo, es decir la presa es estable como se muestra en la Figura 24.

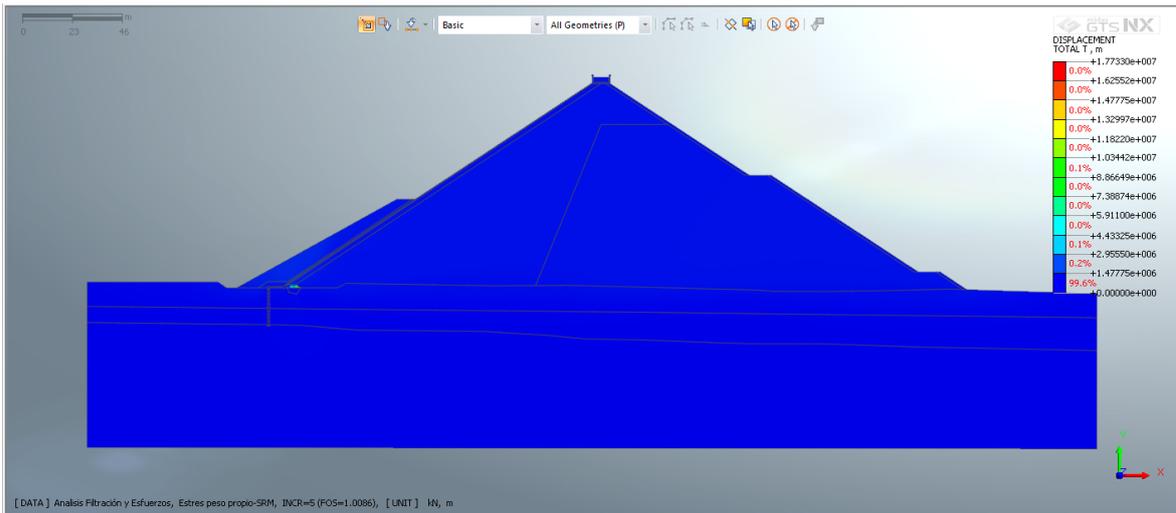


Figura 24. Desplazamiento de la presa.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

Los mayores esfuerzos se presentan en la zona 1/3 parte de la altura de la presa en el desembalse rápido, tal como se muestra en la Figura 25.

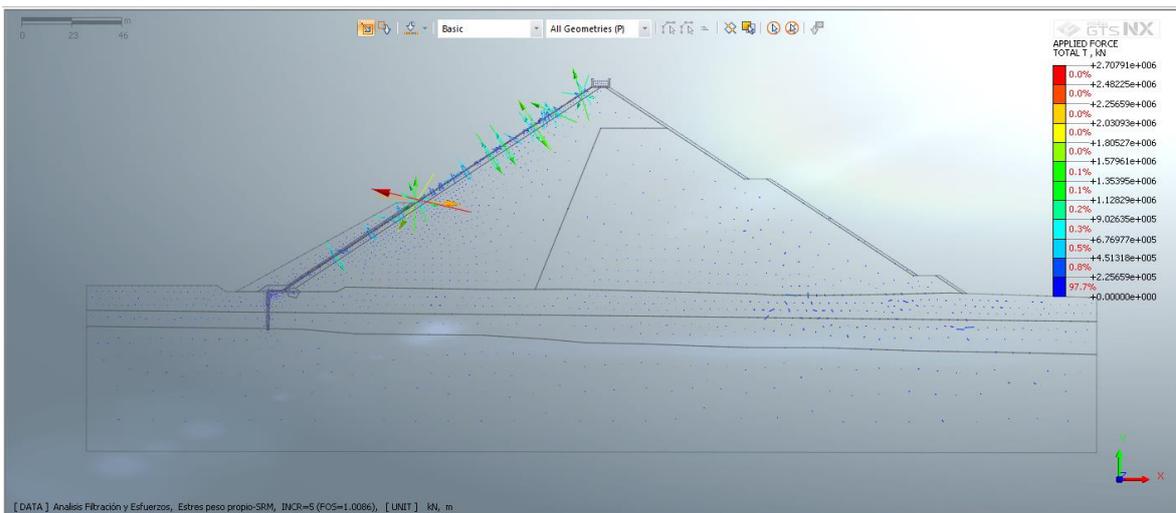


Figura 25. Esfuerzo total de la presa.

Fuente: Resultados simulación de filtración programa MIDAS GTS NX.

5.3. Análisis e interpretación de resultados

5.3.1. Filtraciones

Las filtraciones que se presentan en la presa de efectúa a través de la cara de concreto y de la pantalla plástica. El gradiente hidráulico es muy cercano a la línea del aluvial, es decir, el material 3B y 3C al tener importante permeabilidad reducen de manera importante el gradiente, lo cual es

consistente con la presión de poros que se localiza en la zona aguas arriba de la cara de concreto y de la pantalla plástica.

En el escenario de la presa en operación con embalse en su nivel NAMO se obtiene la mayor filtración de 53.15 m³/día, lo cual es un caudal aceptable al considerando el nivel lleno de la presa. La filtración amenora a 36.92 m³/día en la cota 302 donde se analizó el nivel de desembalse rápido.

La zona de mayor velocidad de la filtración se produce en el aluvial debido a su alta permeabilidad, esto es favorable pues actúan como dren debajo de la presa amenorando la presión de poros y por ende el gradiente hidráulico se deprime de manera importante en el cuerpo de la presa.

5.3.2. Esfuerzos

De acuerdo a las propiedades geotécnicas de los materiales constitutivos de la presa Palo Redondo, se obtiene a través de la simulación de estabilidad de la presa, factores de seguridad que superan a los valores mínimos exigidas, por lo tanto, es una presa segura en cuanto a su estabilidad.

Sin embargo, es necesario hacer notar que la simulación de la presa ha sido realizada siguiendo los materiales utilizados en la construcción de la presa, sin embargo, la obra no ha sido construida en su totalidad, estando al 70%, por lo tanto, en el supuesto que el saldo de obra se realizara la construcción con materiales de propiedades distintas a la utilizada en la investigación, se tendría diferencias en los resultados.

Para el escenario de presa construida sin almacenamiento de agua, y sin considerar la cara de concreto, parapeto, materiales 1A y 1B se obtiene que la presa no sufre desplazamientos en el eje x, toda vez que los esfuerzos son verticales debido al peso propio de los materiales que actúan en el sentido de la gravedad.

En el escenario de operación existe un mínimo desplazamiento en la zona del plinto, sin embargo, al ser un plinto flotante con secciones(losas) acopladas con material que permita un mínimo desplazamiento, conlleva a que las losas no sufran mayores deformaciones. El mayor esfuerzo se observa en la zona aguas arriba de la presa y de la pantalla plástica debido al mayor peso del agua que se tiene en esa zona.

Para el escenario de llenado y desembalse rápido, el desplazamiento en la zona del plinto es muy similar al escenario de operación, sin embargo, el mayor esfuerzo se tiene a $1/3$ de altura de la presa debido al llenado y desembalse rápido, sin que ello supere a los factores de seguridad mínimos necesarios; en ese sentido, en las condiciones de simulación realizada se tiene una presa estable y segura.

CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

- 5.1. De acuerdo a los resultados obtenidos de la filtración en el cuerpo y cimentación de la presa, cumple con la ley de Darcy; sin embargo, en contraste con lo manifestado por Tapia (2009), la modelación numérica mediante elementos finitos representa la filtración a través del gradiente hidráulico, por lo tanto, el caudal de la filtración en medios granulares con movimiento no turbulento si resulta posible ser modelado en los programas computacionales a través de las líneas isóbaras que resulta ser coincidente con la ley parabólica al obtener una curva similar a la parábola en la acumulación del caudal sobre el área respecto al tiempo, siendo esto consistente con la investigaciones de Parkin (1971) y Toledo (2004).
- 5.2. El gradiente hidráulico se relaciona con la presión de poros, en la medida que la línea de gradiente se encuentre más elevado, la presión de poros incrementa, esto conllevaría que la estabilidad de la presa pueda verse comprometida tal como es indicado por Meza (2012). En caso de producirse una erosión interna en el cuerpo de presa conllevaría a que el gradiente hidráulico sea afectado, tal como ha sido señalado por Ivanchuck et. al. (2017).
- 5.3. La matriz de succión interviene en los materiales 2B, 3B y 3C al ser materiales que no siempre están saturados. Esta succión importa en el análisis de esfuerzos que se somete la presa, pues el suelo parcialmente saturado representa un potencial de agua, la succión total viene a estar conformada por la succión matricial y osmótica, al incrementar la presión de poros de manera negativa provoca presiones intersticiales negativas influyendo en la estabilidad de la presa, esto es respaldado por la investigación de Hernández (2011).
- 5.4. Las filtraciones obtenidas en los diversos escenarios resultan encontrarse en el rango permisible, sin embargo, para lograr una disminución de la filtración es necesario aplicar una importante impermeabilización en el basamento rocoso a través de la cortina de inyecciones y estribos. La filtración es mayor cuando se encuentra en embalse lleno; en la medida que la altura de agua decrece, la filtración disminuye al existir una menor presión de agua en la cara de concreto y pantalla plástica además de disminuir el

área de contacto de la cara de concreto con el agua, teniéndose de esta manera resultados cercanos a Intertechne (2015).

- 5.5. La estabilidad de la presa cumple con los factores mínimos de seguridad de acuerdo a lo establecido por USACE (2004) en los escenarios analizados. Para el llenado y desembalse rápido se observa que los factores de seguridad son cercanos al mínimo necesario, sin que ello signifique que no sea estable. En los escenarios de presa construida se tiene un adecuado factor de seguridad, para el escenario de operación se logra obtener un factor de seguridad suficiente de estabilidad.

CONCLUSIONES

- a) Las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del relleno de la Presa Palo Redondo son adecuadas posibilitando que el gradiente hidráulico no contribuya a un incremento de presión de poros en el cuerpo de la Presa lo cual impacta de manera positiva en la estabilidad de taludes de la Presa.
- b) Las propiedades geotécnicas de los materiales 1A, 1B, 2A, 2B, 3B, 3C y 3D cumplen con los requerimientos de permeabilidad, elasticidad y peso propio que contribuye a tener una filtración permisible y adecuada estabilidad.
- c) La mayor filtración en la presa es del orden de $53.62\text{m}^3/\text{día}$ lo cual es permisible, y se presenta cuando se alcanza el nivel NAMO (Nivel de Agua Máxima de Operación), cota 344 msnm. Cuando disminuye la filtración a la cota 302msnm se obtiene una filtración de $36.92\text{m}^3/\text{día}$. El flujo de la filtración se realiza en la zona del aluvial debido a que presenta alta permeabilidad, lo cual es favorable pues actúa como un dren horizontal en la cimentación de la Presa.
- d) Los factores de seguridad obtenidos en el escenario de construcción de presa, operación, llenado y desembalse rápido cumplen con los mínimos necesarios para garantizar la estabilidad de la presa.
- e) Los esfuerzos en la presa construida en el escenario de obra culminada, son verticales por acción de la gravedad, en el escenario de operación se tiene mayores esfuerzos en la parte aguas arriba de la cara de concreto y de la pantalla plástica. La línea de flujo de filtración se da a través de la cara de concreto, pantalla plástica y debajo de la misma por efecto de la presión del agua.
- f) Considerando los resultados de filtración y estabilidad, no se observa mayores riesgos en la seguridad de la presa; sin embargo, al ser una obra no concluida se presenta las recomendaciones en la sección siguiente.

RECOMENDACIONES

- a) Culminar la construcción de la presa utilizando los materiales bajo los parámetros y propiedades usados en la construcción del 70% de obra. Un cambio de la calidad del material y granulometría repercutiría en la filtración y la estabilidad de la presa.
- b) Realizar control de los asentamientos de la presa, asimismo en la etapa de operación modelar la filtración considerando los caudales unitarios de la filtración con la finalidad de contrastar los flujos que estarían pasando a través de la pantalla plástica, plinto y cara de concreto.
- c) Realizar simulación de filtraciones a nivel tridimensional en la cual considere las filtraciones en la zona de estribos, de esta manera se cuantificará la pérdida total de volumen de agua al año del embalse; en ese sentido se pueda considerar acciones tendentes a cumplir con el balance hídrico del sistema Chavimochic.
- d) Evaluar la estabilidad mediante un análisis dinámico de la presa para revisar el comportamiento de la estabilidad de la presa ante un sismo de importante magnitud (superior a 8 grados en escala Richter).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía

- Álvarez M., Álvarez L. y Vásquez R. (2017). Evaluación de riesgos y modelación de soluciones técnicas para filtraciones en presas de tierra. *Enfoque*, 26-36.
- Basile, P. (2018). *Transporte de sedimentos y morfodinámica de ríos aluviales*. Argentina: Universidad Nacional de Rosario. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2133/10738>
- Beltrán, L. (1995). Expansión de los suelos arcillosos parcialmente saturados. *Ingeniería e investigación*, 1-11. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902824.pdf>
- Bishop, A. (1954). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, 7-17.
- Burgos, et. al. (2018). Estabilidad de taludes en presas de tierra bajo diversas condiciones de carga considerando las leyes de la mecánica de suelos parcialmente saturados. *Natural Resource Management*, 1-9. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/331413867_ESTABILIDAD_DE_TALUDES_EN_PRESAS_DE_TIERRA_BAJO_DIVERSAS_CONDICIONES_DE_CARGA_CONSIDERANDO_LAS_LEYES_DE_LA_MECANICA_DE_SUELOS_PARCIALMENTE_SATURADOS.
- Cruz, P. y Lobo, R. (2004). *Leakage on concrete face rock-fill dam*. Italia: Chinese National Committee on Large Dams.
- Cruz, P., Materón, B. y Freitas, M. (2009). *Concrete face rockfill dams*. Gran Bretaña: CRC Press/Balkema.
- De Cea, J. C. (2007). Seguridad de presa de tierra y escollera. *Revista de Obras Públicas*, 39-52.
- Espinoza, M. (2010). *Ingeniería de presas de escollera*. Mendoza: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cuyo.
- FAO, O. d. (6 de Julio de 2019). *FAO Suelos*. Obtenido de http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

- Flores, et. al. (2020). Estabilidad de taludes durante un desembalse rápido en presas de tierra con suelos parcialmente saturados. *Ingeniería y desarrollo*, 38(1), 13-31. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v38n1/2145-9371-inde-38-01-13.pdf>
- Fredlund, D. (1994). Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31(4), 533-546. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/348277689>
- González, C. (2017). *Comparación de los métodos de equilibrio límite y elementos finitos aplicados a la estabilidad de taludes*. Loja: Universidad de Loja. Obtenido de <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/20.500.11962/20702>
- Guevara, R. (2018). Criterios de diseño y experiencias de construcción en presa de enrocado y/o grava con cara de concreto y/o geo membranas. *Tekhné*, 14-25.
- Hernández, G. (2011). *Estimating the Soil–Water Characteristic Curve Using Grain Size Analysis and Plasticity Index*. Arizona: Arizona State University. Obtenido de https://repository.asu.edu/attachments/56747/content/TorresHernandez_asu_0010N_10702.pdf
- Ivanchuk N., Maartynyuk P., Tsvetkova T. y Michuta O. (2017). Mathematical modeling and computer simulation of the filtration processes in earth dams . *Eastern European Journal of enterprise technologies* , 63-69.
- Jalil A., Ahmed B. y Mohamed E. (2020). Erosion–Filtration Analysis for Assessing Hydraulic Instability of Dams in Morocco and Global Warming Effect. *Springer Cham*, 447-454.
- Jansen, R. (1988). *Advanced dam engineering for design, construction and rehabilitation*. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Jones, J. (2004). Pipe and piping. *Encyclopedia of Geomorphology*, 784-788.
- Leps, T. (1970). Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(4), 1159-1170. Obtenido de <https://vsip.info/leps-review-of-shearing-strength-rockfill-2-pdf-free.html>

- Leps, T. (1973). Flow through rockfill. *Embankment dam engineering* , 87-107.
- Li, X. (2011). Fuerzas de filtración y efectos de sumersión en taludes granulares de presas y bordos. *Pan-Am CGS Geotechnical*, 1-44. Obtenido de <http://geoserver.ing.puc.cl/info/conferences/PanAm2011/panam2011/pdfs/GEO11Paper886.pdf>
- Lyapichev, Y. (2012). *Validación del diseño de la presa Limón de alturas de 43m (construida) y 82m (sobreelevación futura) para escenarios estáticos y dinámicos*. Lambayeque: PEOT.
- Meza, V. (2012). Suelos parcialmente saturados, de la investigación a la cátedra universitaria. *Boletín de ciencias de la tierra*(31), 23-38. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169524098003>
- Morán, R. (2013). *Mejora de la seguridad de las presas de escollera frente a percolación accidental mediante protecciones tipo repié*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Parkin, A. (1971). Field solutions for turbulent seepage flow. *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 209-218.
- Reclamation, B. o. (1985). *Seismic Analysis of Concrete Face Rockfill Dams - Concrete Face Rockfill Dams, Design, Construction and Performance*. ASCE.
- Romana, et. al. (2003). SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. *Polytechnic University of Valencia*, 1-4. Obtenido de https://www.stmr.es/recursos/downloads/STMR_Art_SMRGeomechanicsClassification.pdf
- Shahraki, A., Shahraki, J. y Hashemi, S. (2019). An Integrated Water Resources Management Considering Agricultural Demands and the Assessment of Different Scenarios in Hirmand Catchment, Iran. *Water Resources*, 46, 308-317.
- Stephenson, D. (1979). Rockfill and gabions for erosion control. *Rockfill in hydraulic engineering*, 203-208.
- Tapia, C. (2009). *Análisis numérico del proceso de filtración en presas de escollera*. Barcelona: Centro internacional de métodos numéricos de ingeniería.

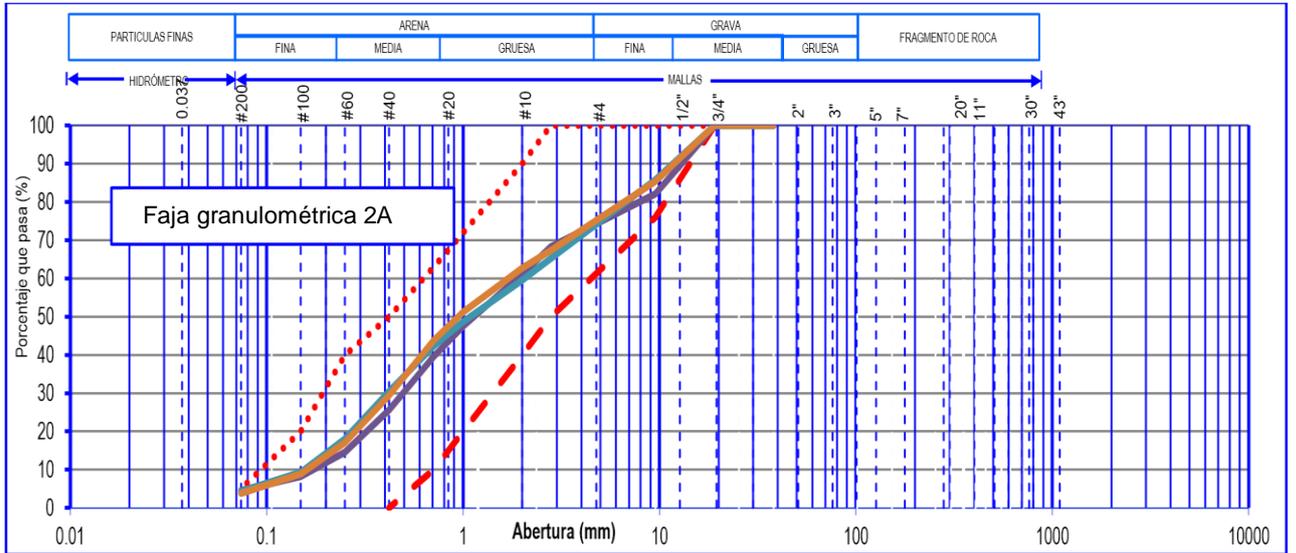
- Terzaghi, K. (1936). *The Shear Resistance of Saturated Soils*. Cambridge: United States of América. Obtenido de https://www.issmge.org/uploads/publications/1/44/1936_01_0017.pdf
- Toledo, M. (1997). *Presas de escolleras sometidas a sobrevertido Estudio del movimiento del agua a través de la escollera y de la estabilidad frente al deslizamiento en masa*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Obtenido de <http://oa.upm.es/730/1/04199701.pdf>
- USACE. (2004). *General Design and Construction Considerations for Earth and Rock-Fill Dams*. Washington: United States Army Corps of Engineers. Obtenido de https://www.publications.usace.army.mil/portals/76/publications/engineermanuals/em_1110-2-2300.pdf
- Velasquez, T. (2013). Estudio de la estabilidad de la obra de represamiento de la laguna Quengococha: Proyecto de Irrigación Cajabamba, Distrito Cajabamba, Provincia Cajabamba, Región de Cajamarca. *Universidad Nacional Agraria La Molina*, 334-340.
- Yangiev A., Gapparoy F. y Adjimuratov D. (2019). Filtration process in earth fill dam body and its chemical effect on piezometers. *Ecs sciences*, 1-7.

ANEXOS

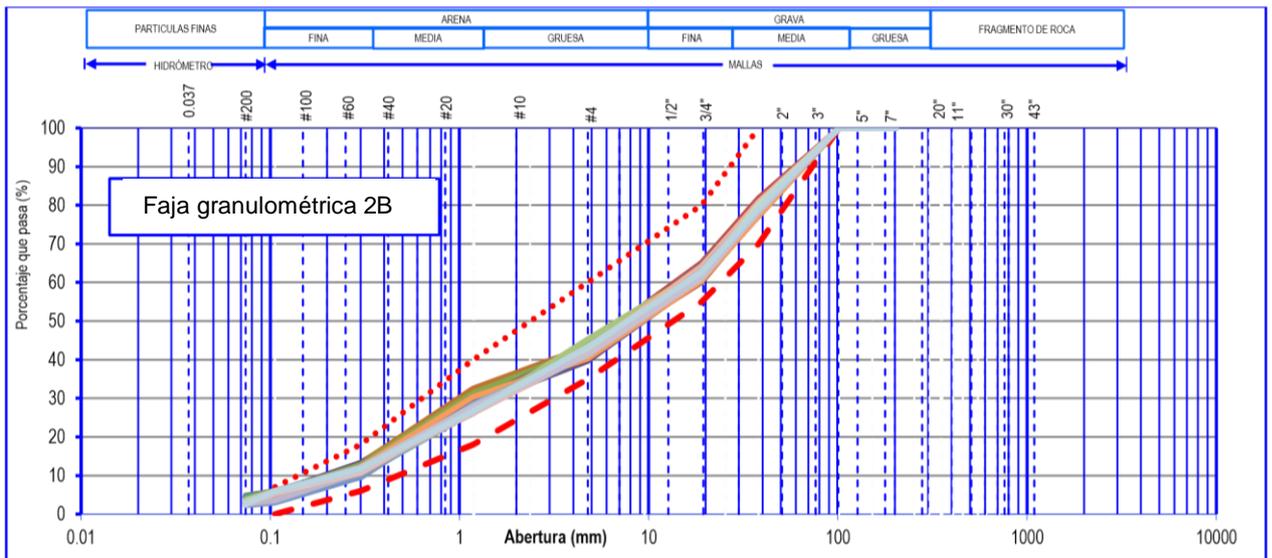
Anexo 01

Fajas granulométricas de los materiales sueltos constitutivos del relleno de presa.

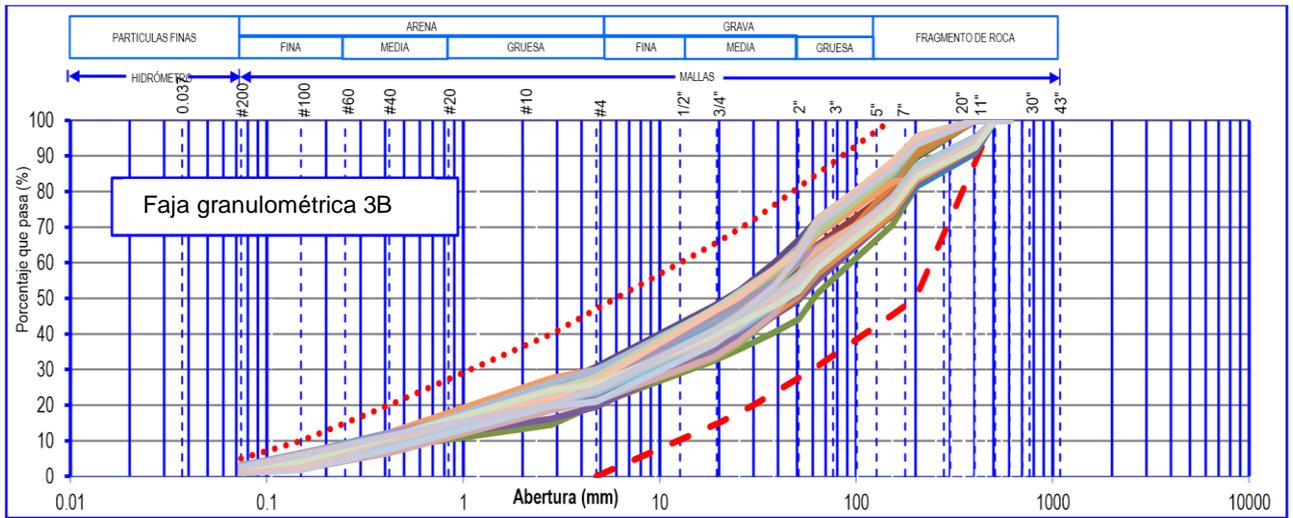
Gráfica 1. Granulometría del material 2A.



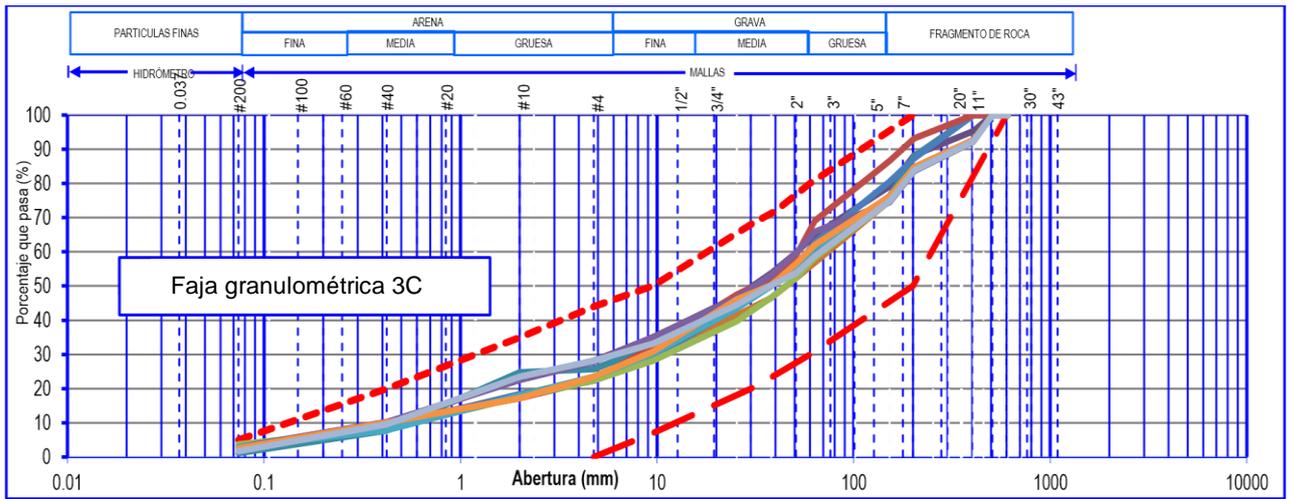
Gráfica 2. Granulometría del material 2B.



Gráfica 3. Granulometría del material 3B.

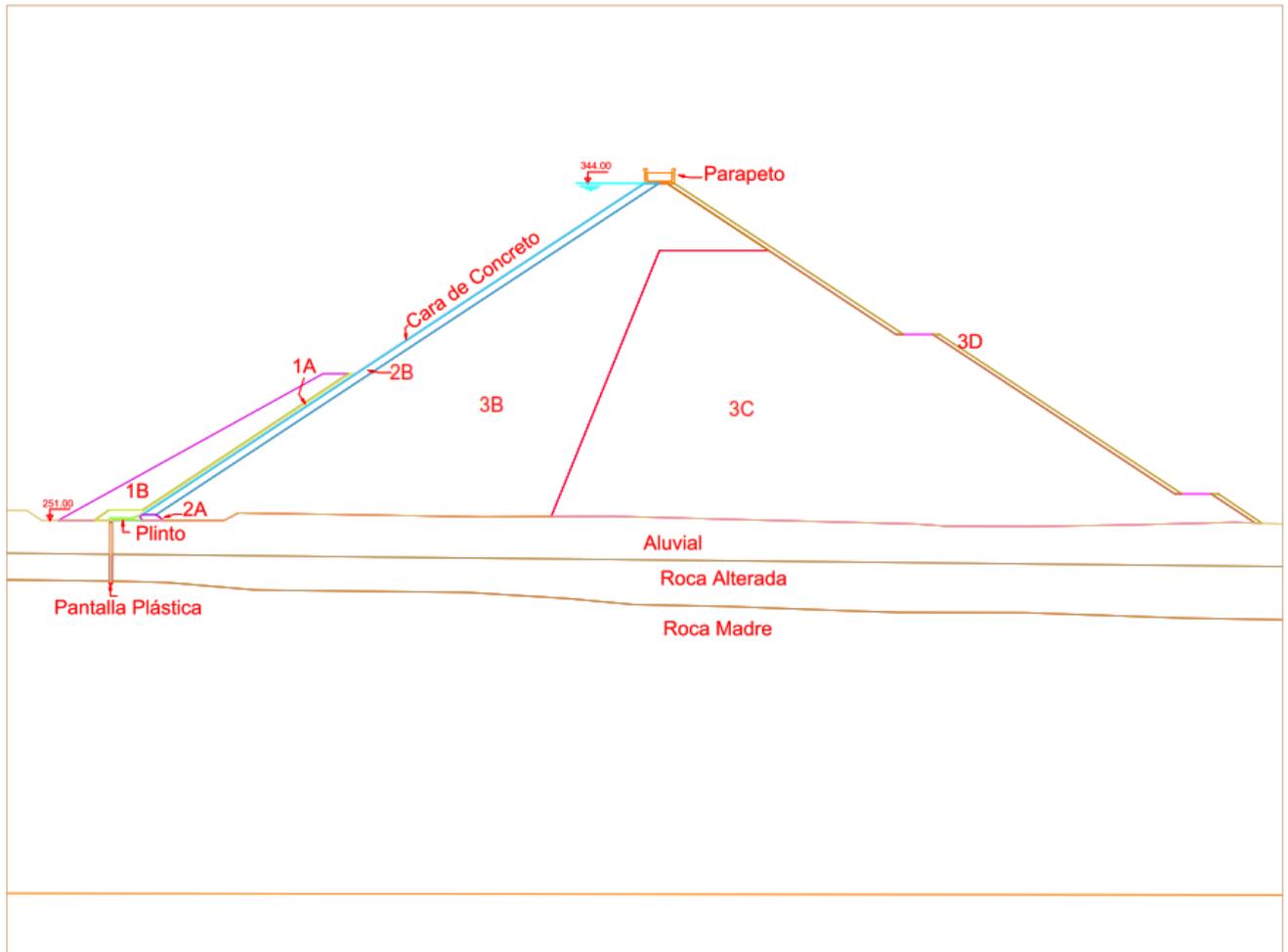


Gráfica 4. Granulometría del material 3C.



Anexo 02

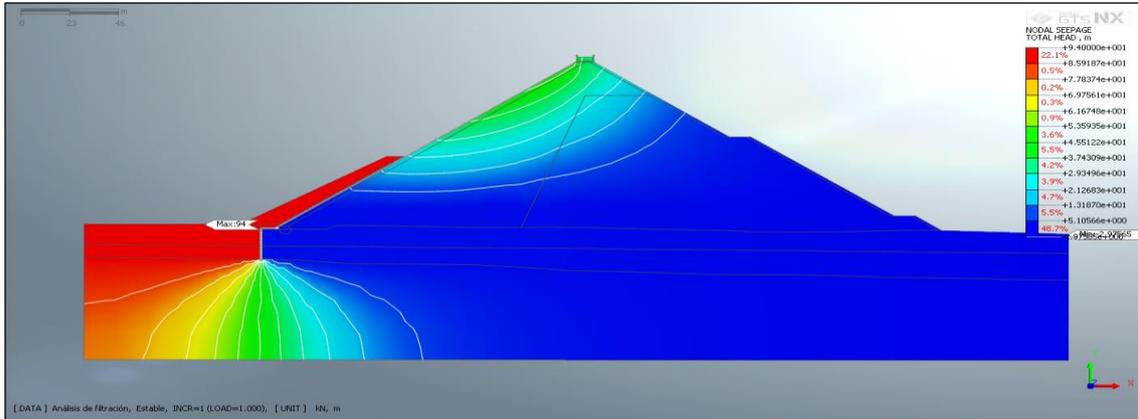
Plano de la sección de la Presa



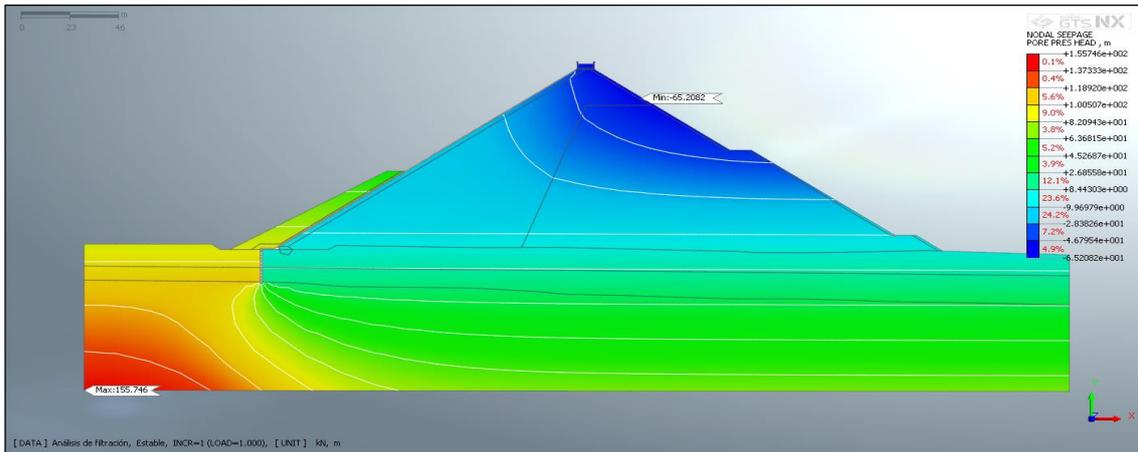
Anexo 03

Resultados de la simulación de filtración y estabilidad de talud de la Presa Palo Redondo.

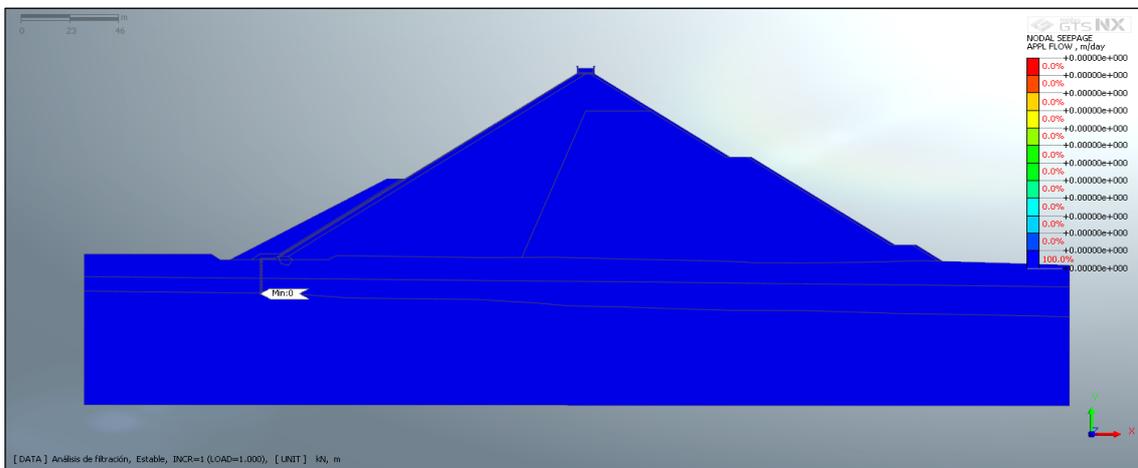
Escenario Estable -Filtración



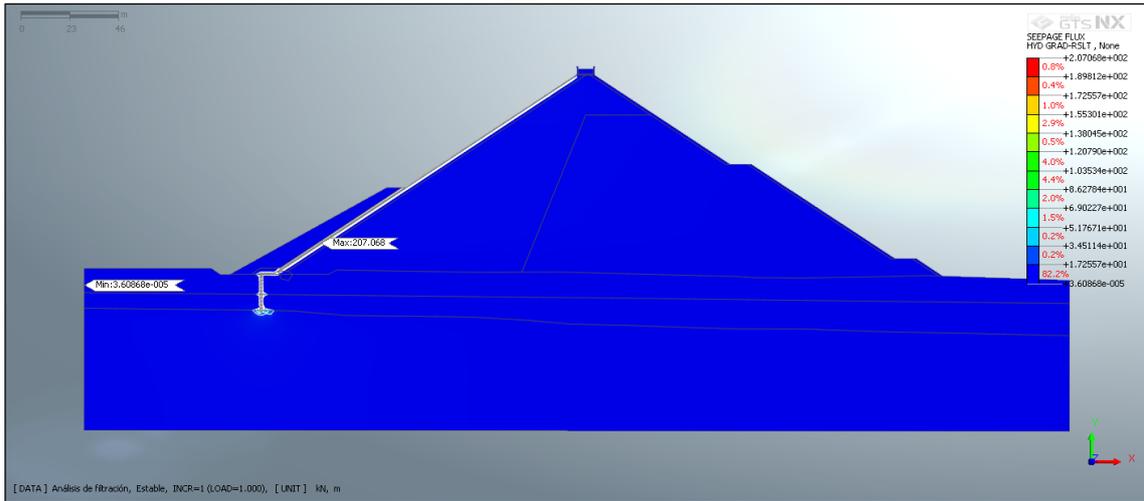
Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



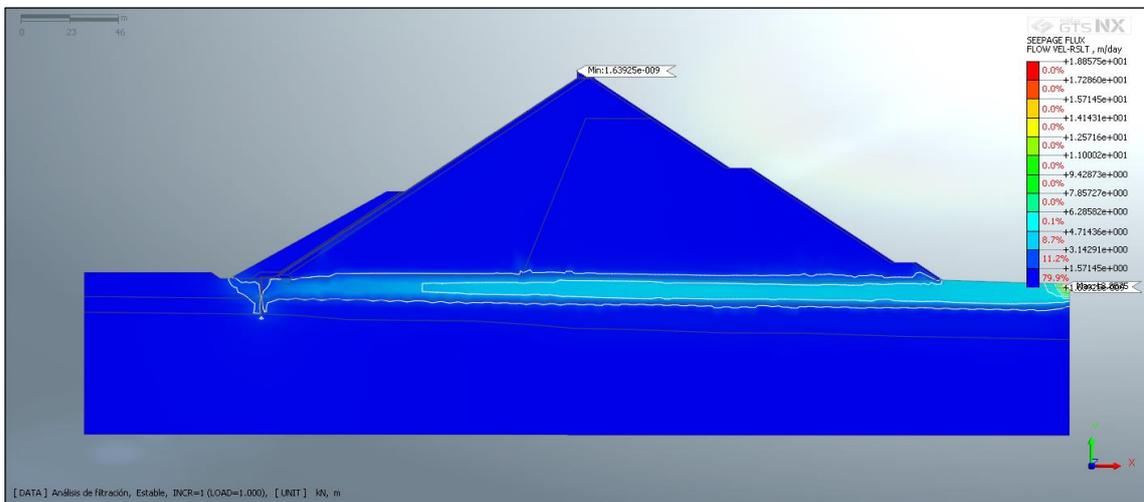
Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



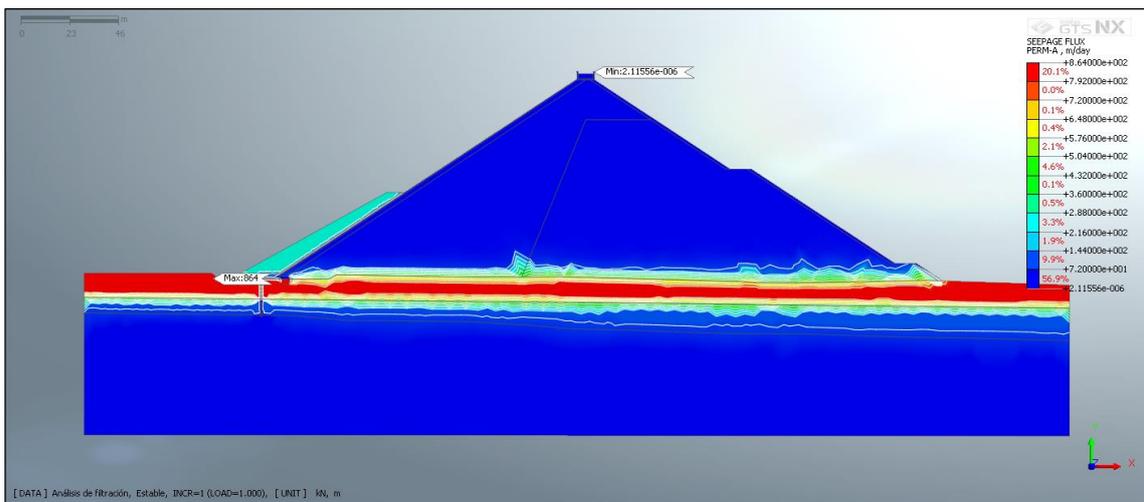
Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Nodal Seepage Results_APPLIED SEEPAGE FLOW_Current.png



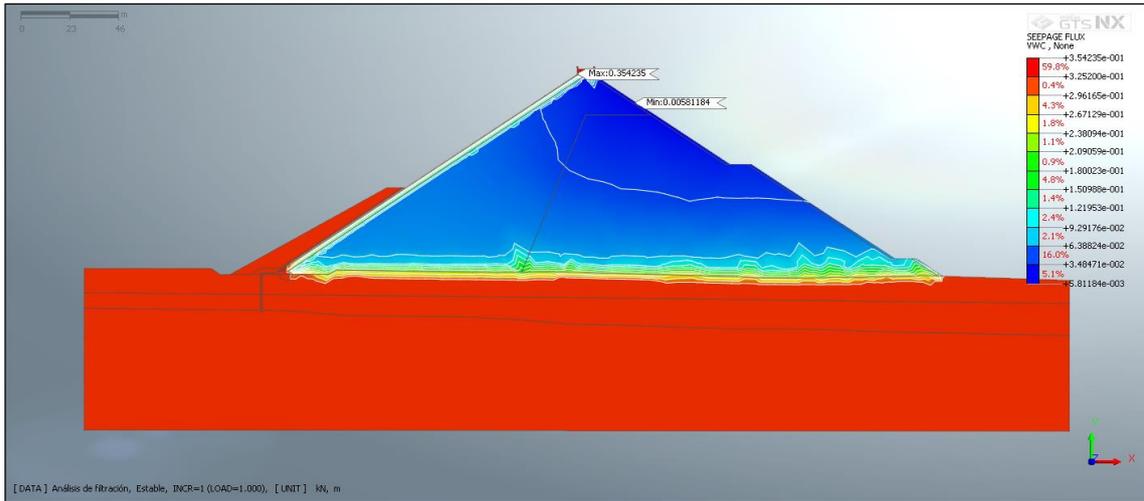
Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



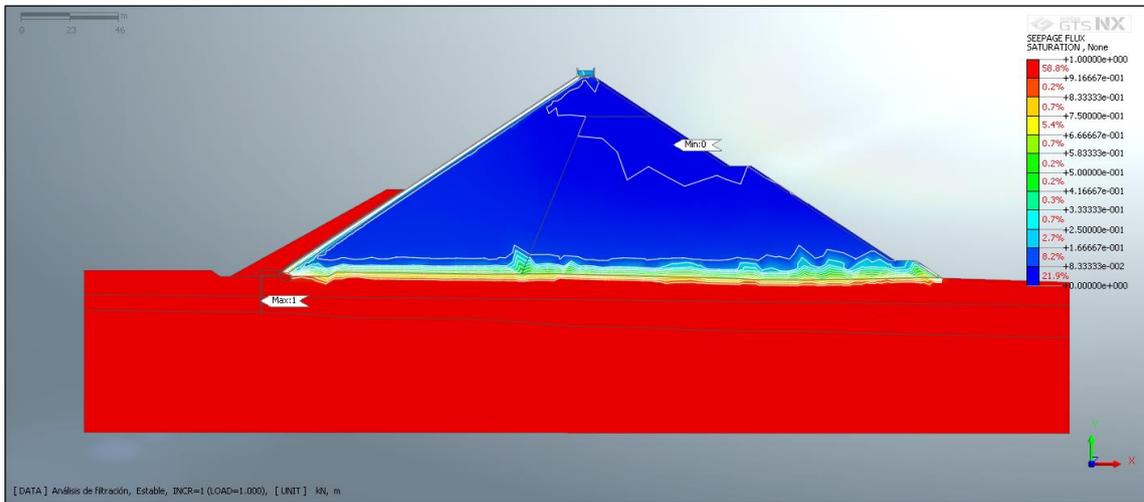
Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png

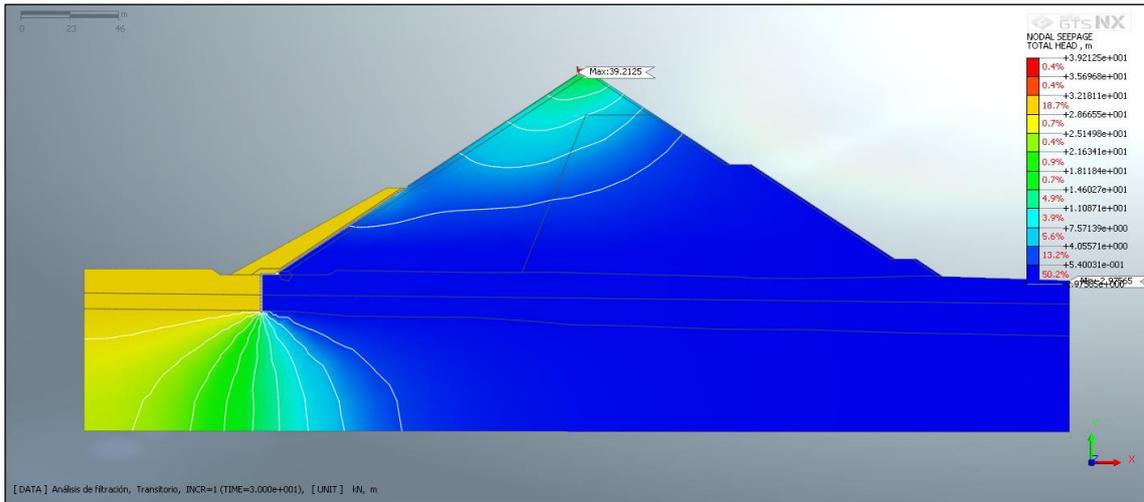


Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png

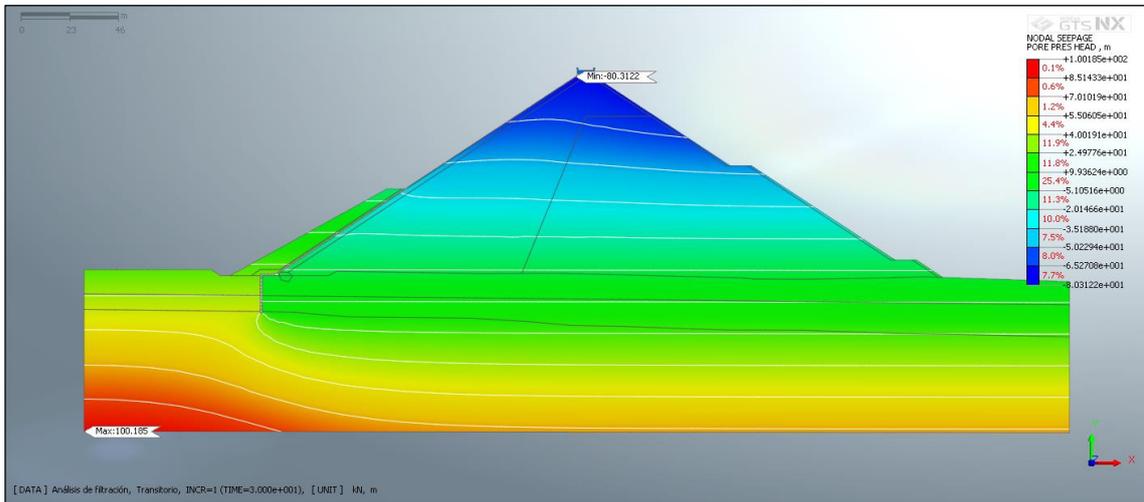


Análisis de filtración_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png

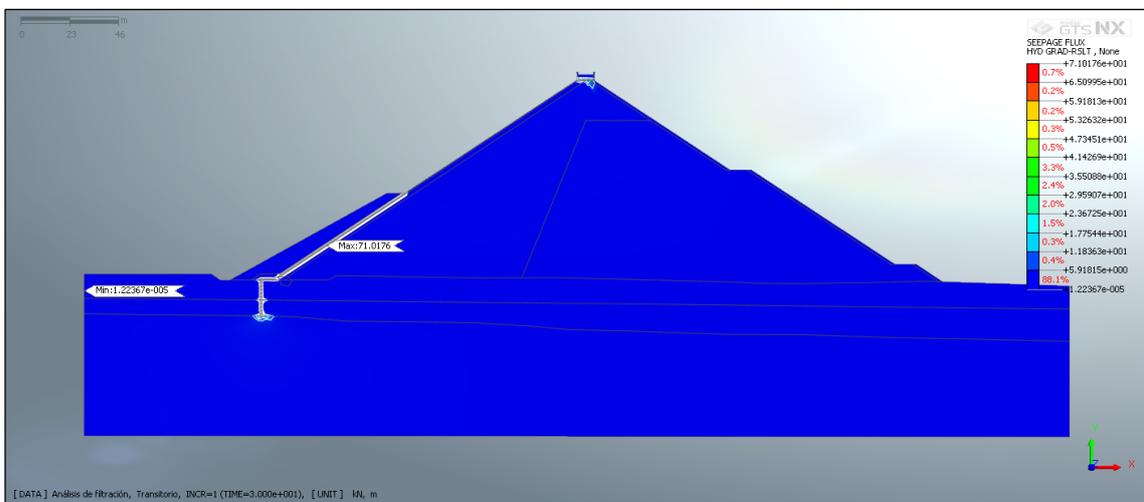
Escenario Transitorio - Filtración



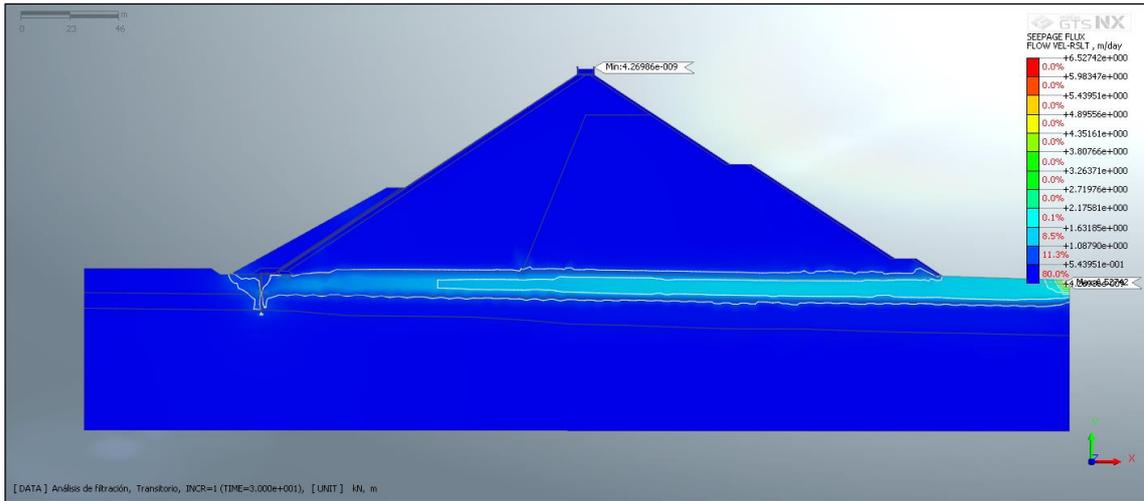
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=1 (TIME=3.000e+001)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



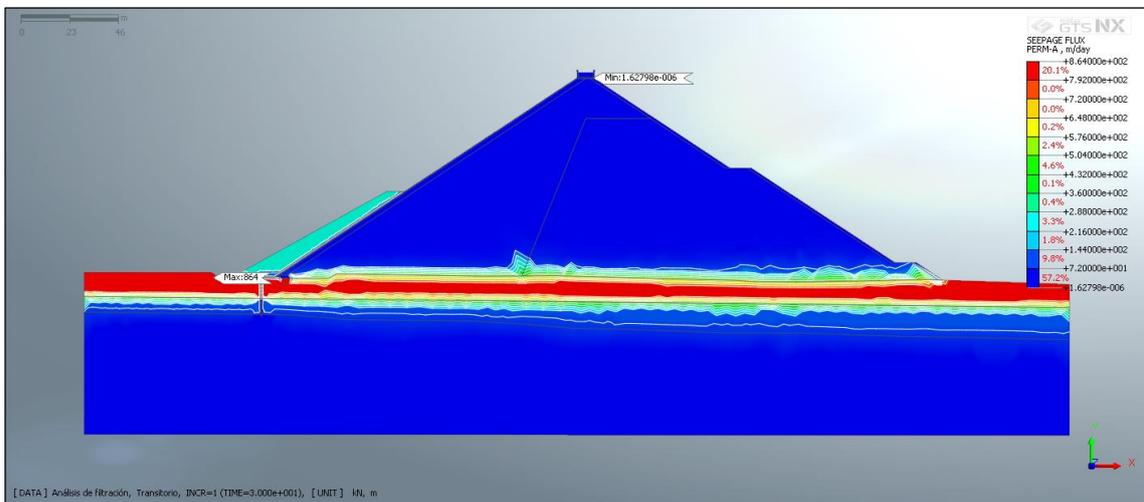
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=1 (TIME=3.000e+001)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



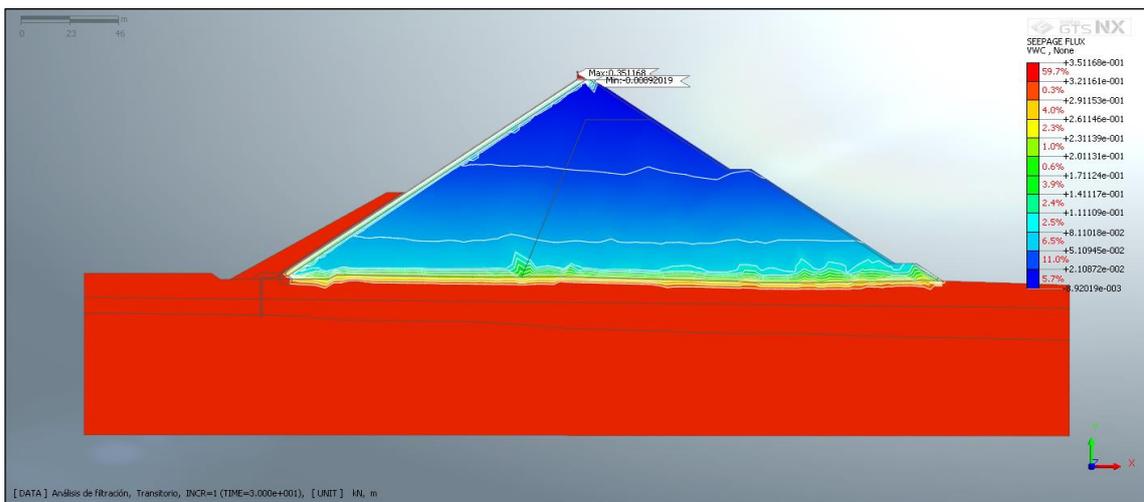
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=1 (TIME=3.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



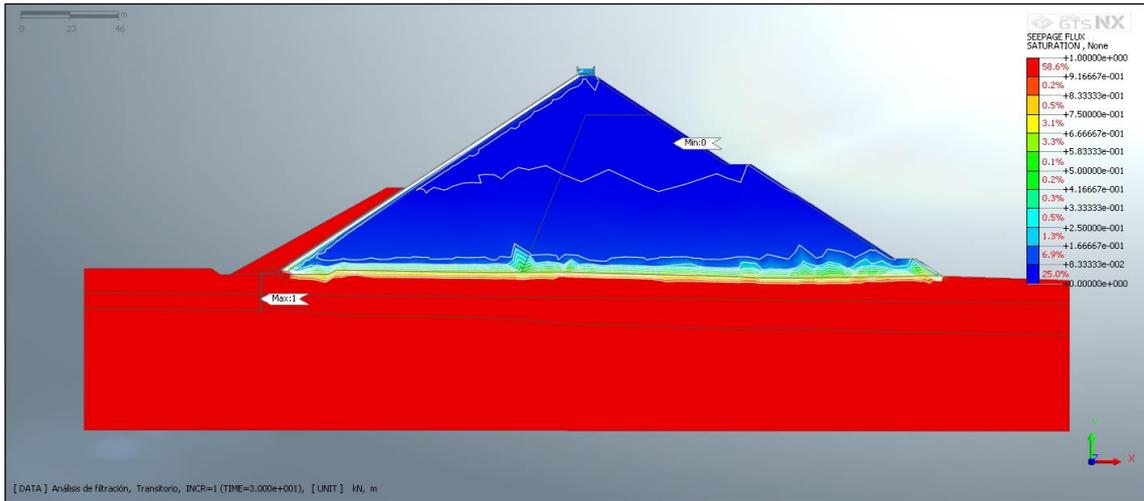
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=1 (TIME=3.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



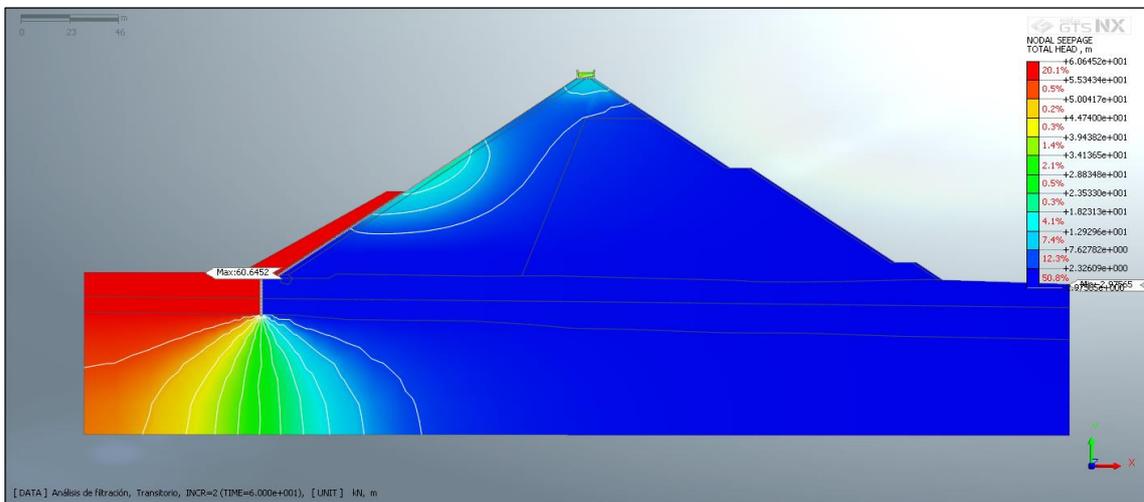
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=1 (TIME=3.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png



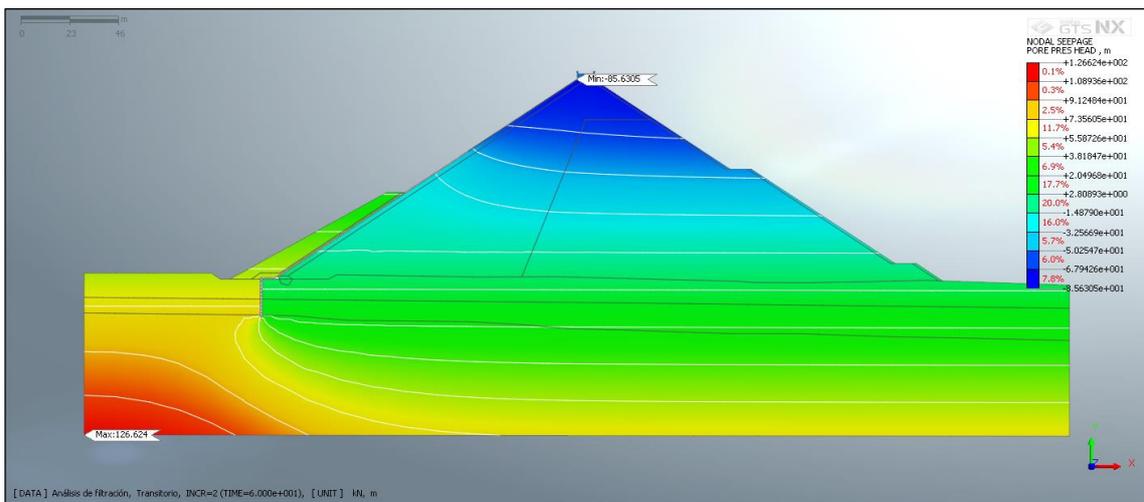
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=1 (TIME=3.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png



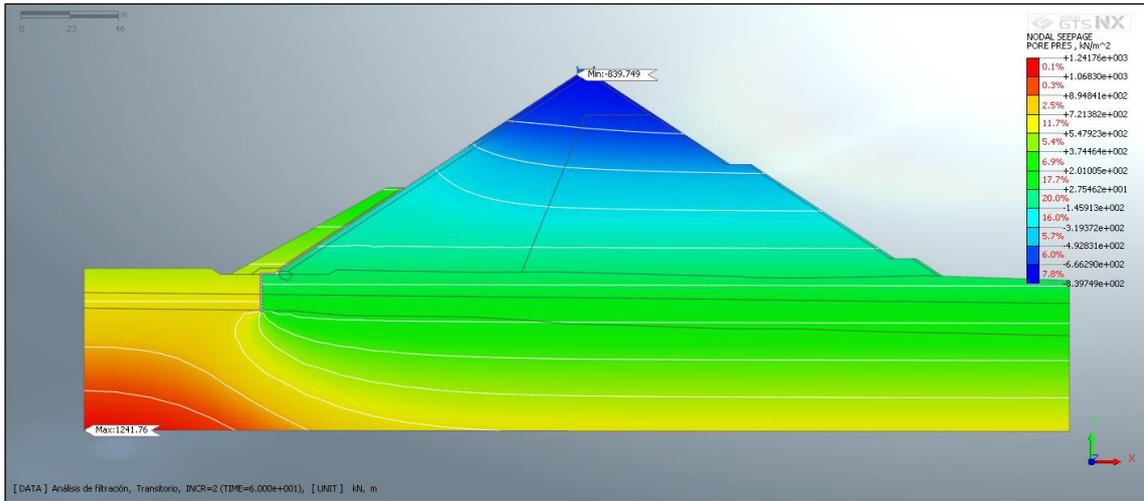
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=1 (TIME=3.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png



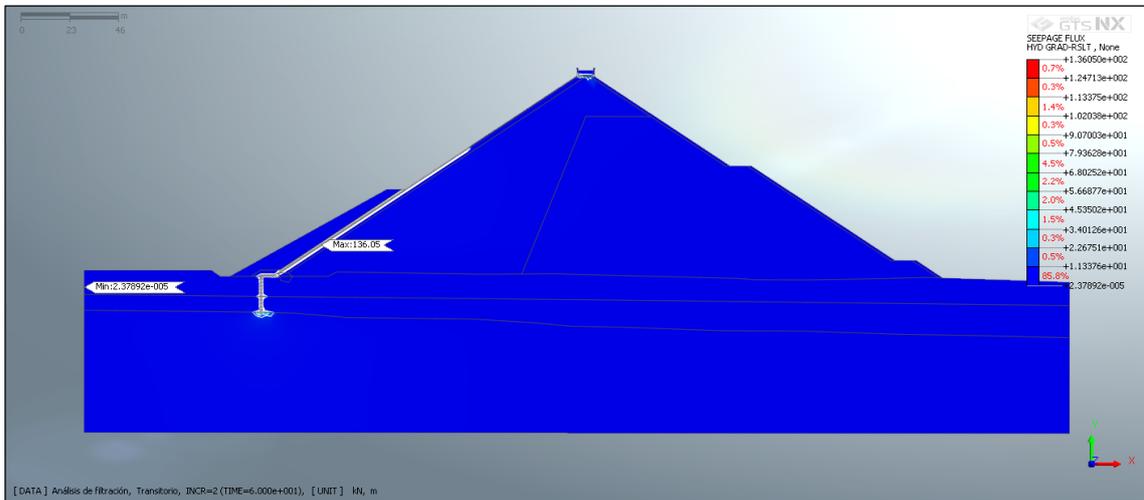
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



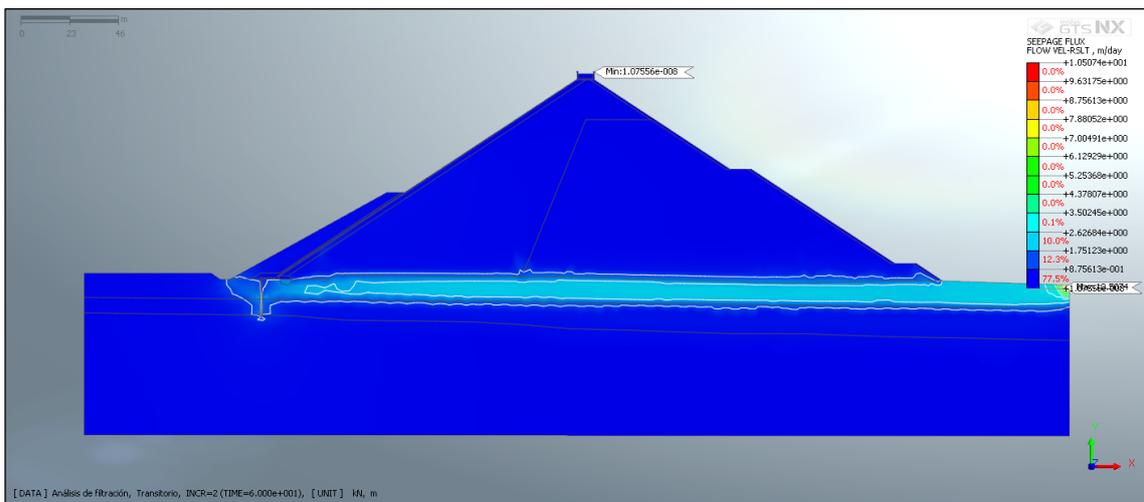
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



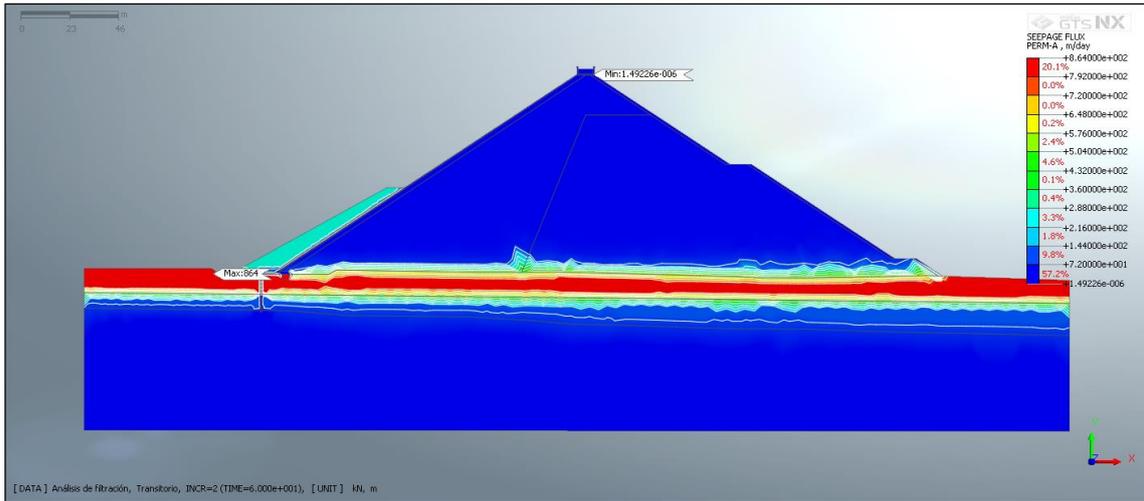
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



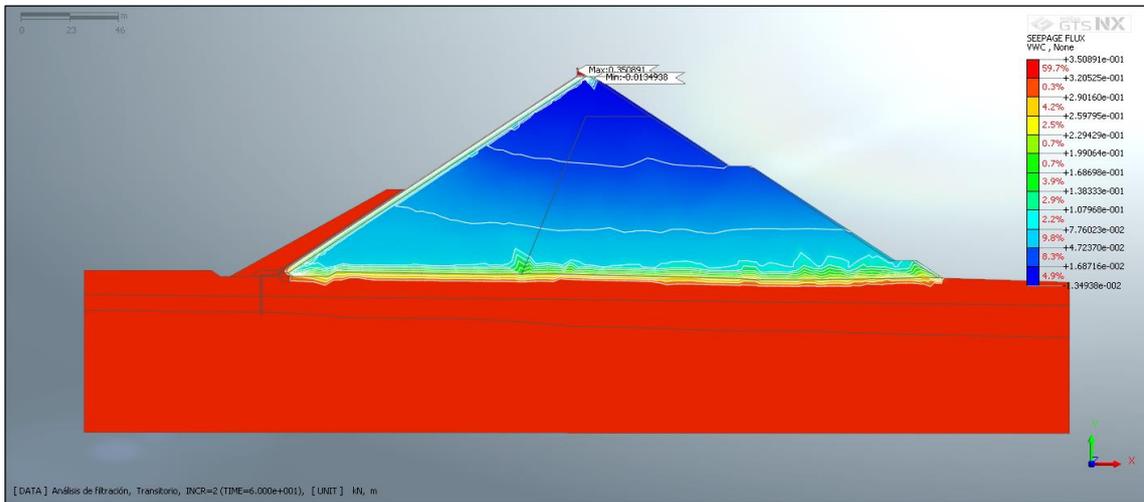
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



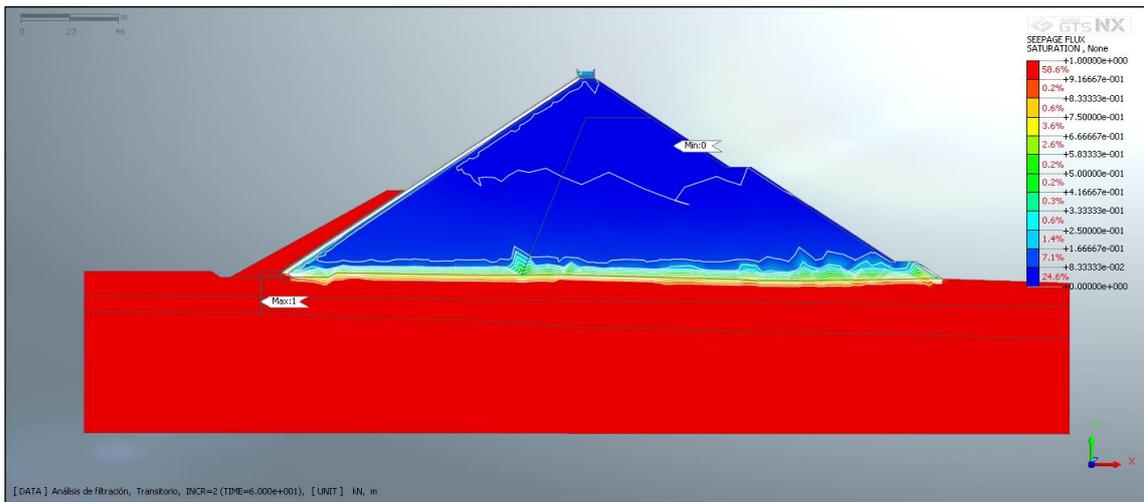
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



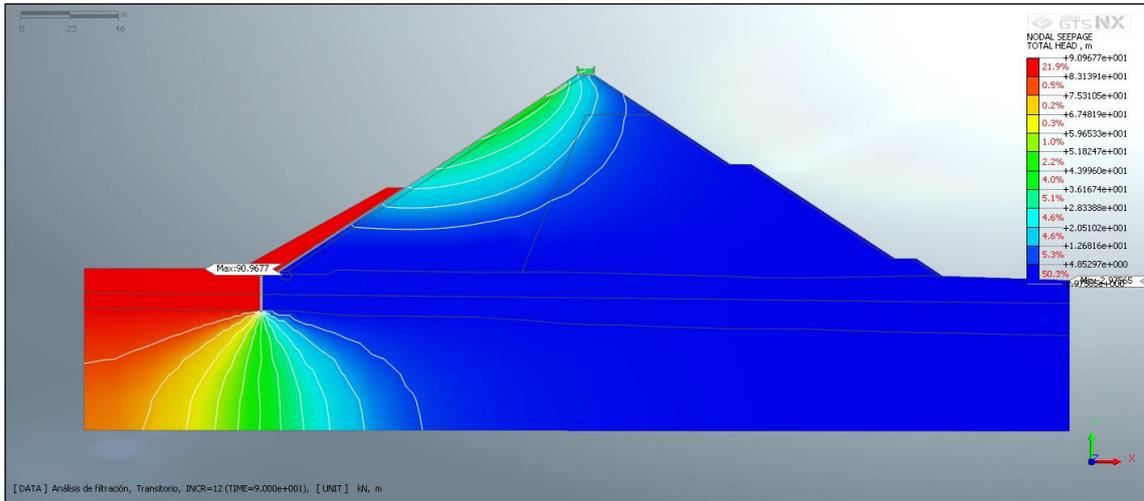
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png



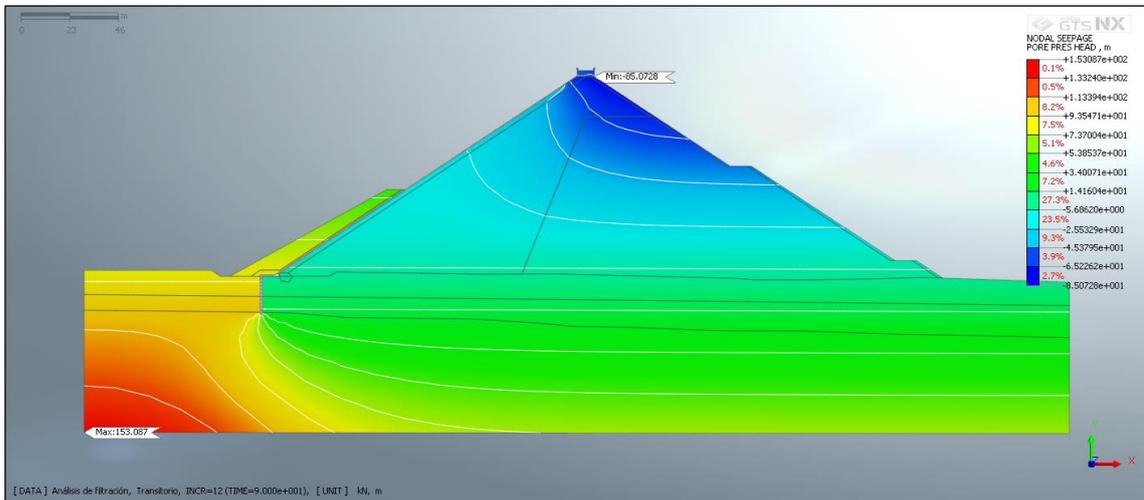
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png



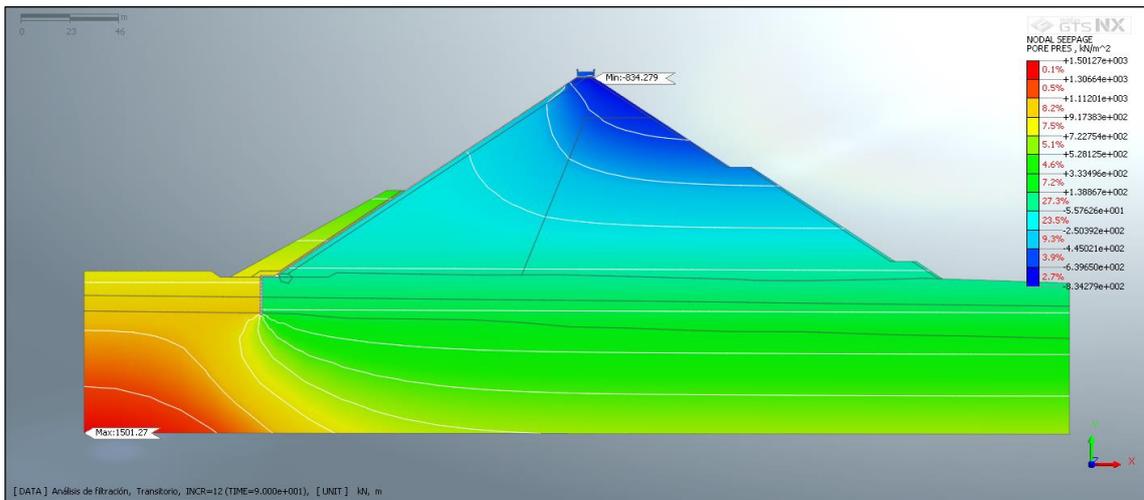
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=2 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png



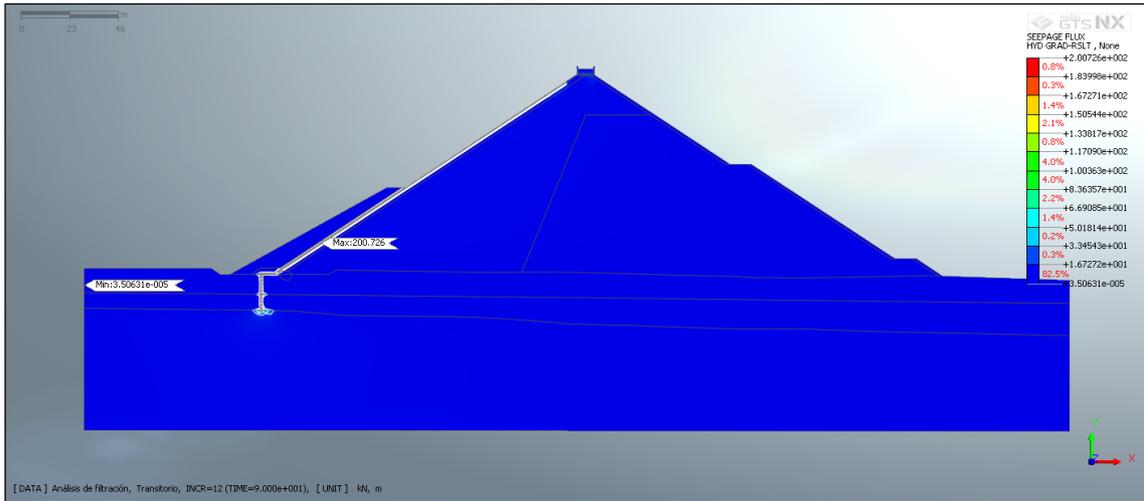
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



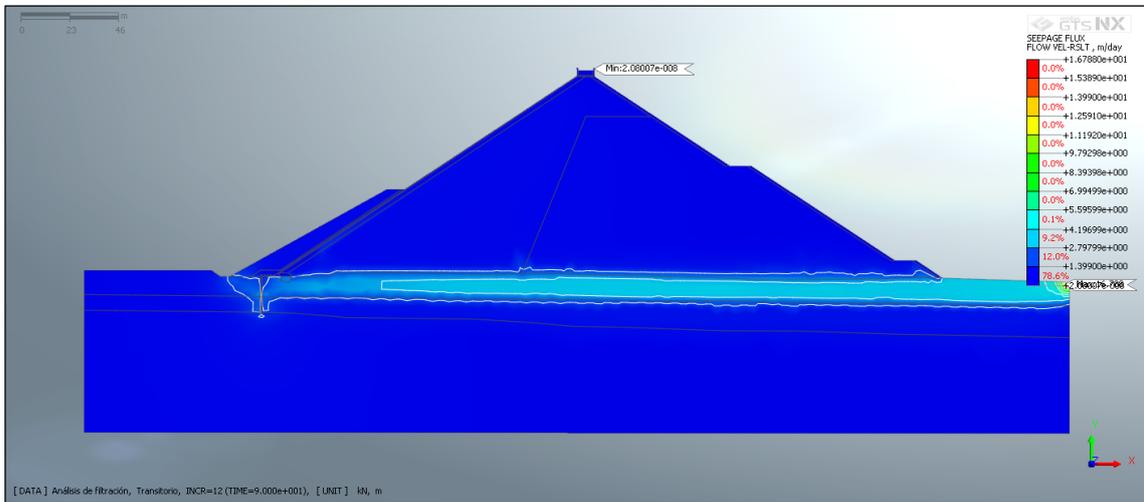
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



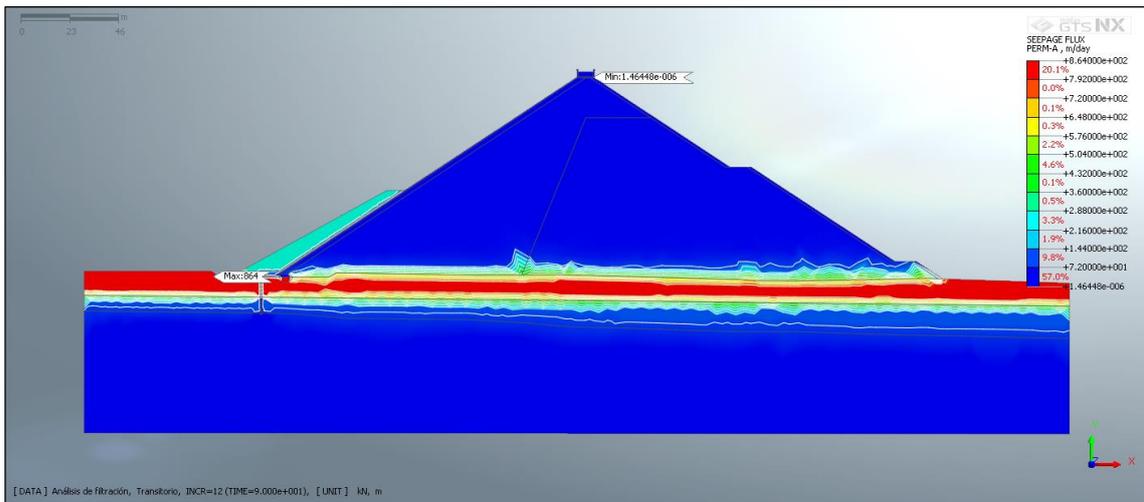
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



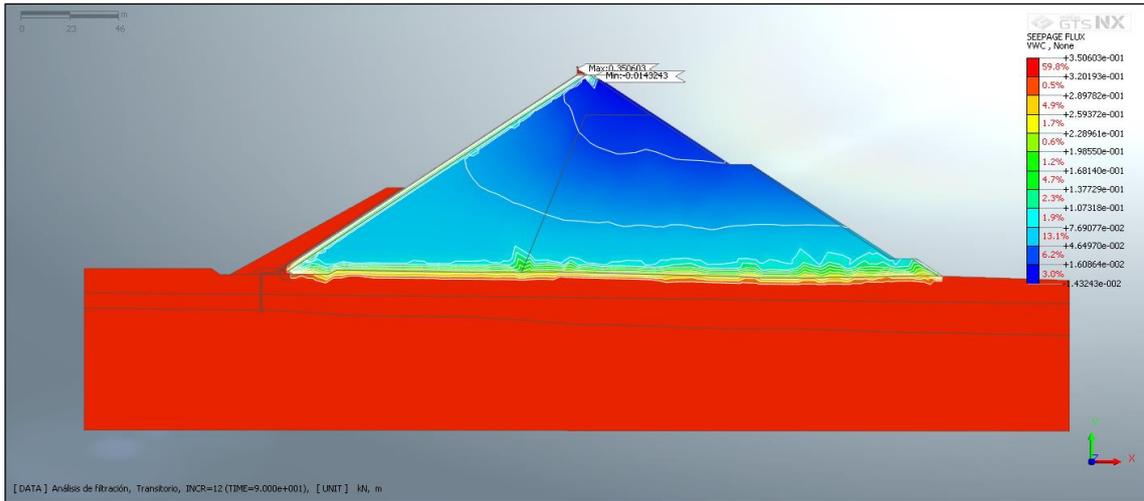
**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png**



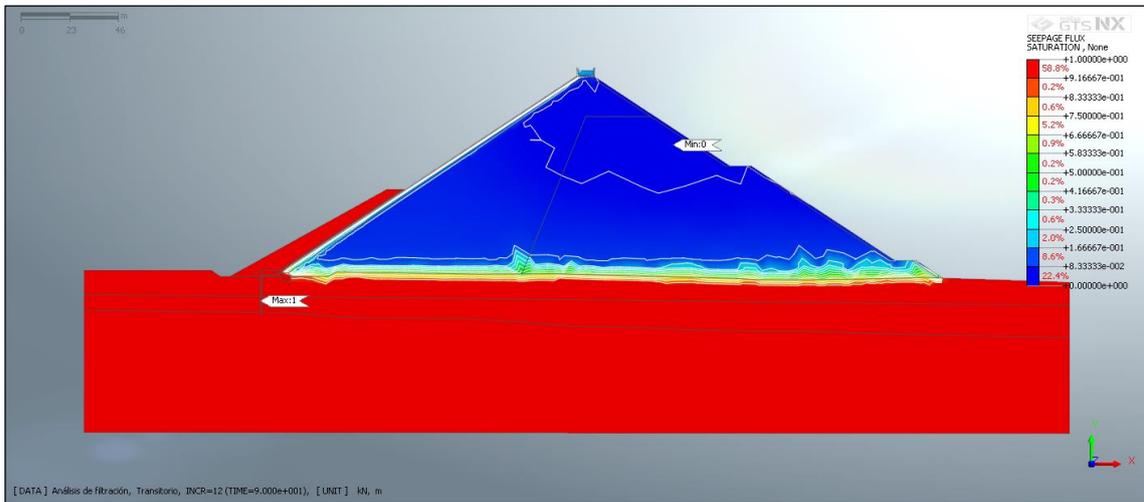
**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png**



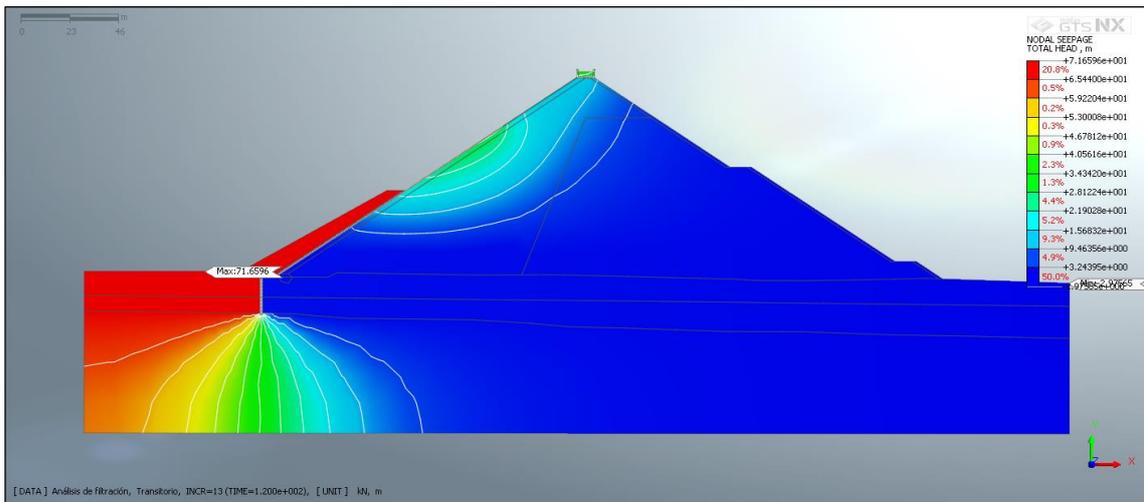
**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png**



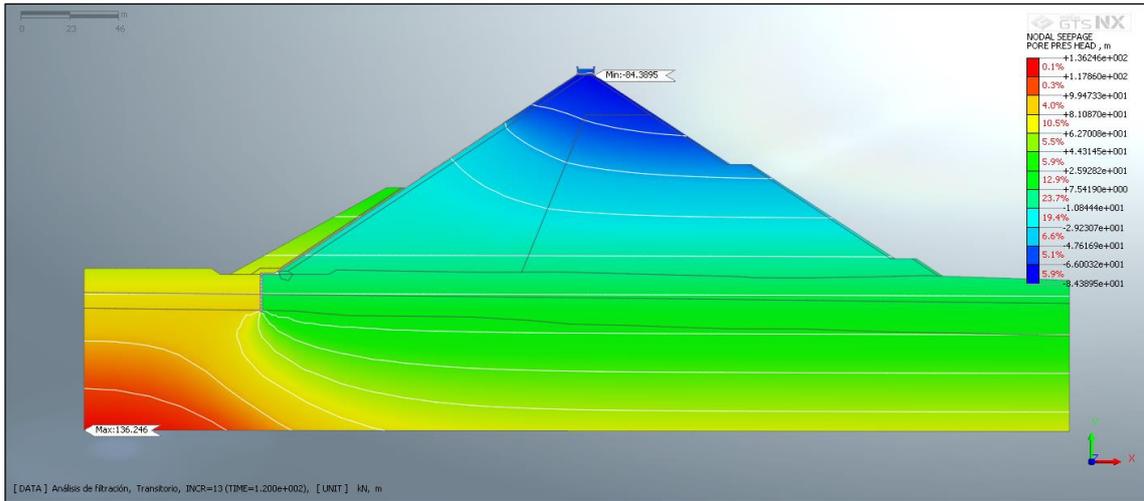
**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png**



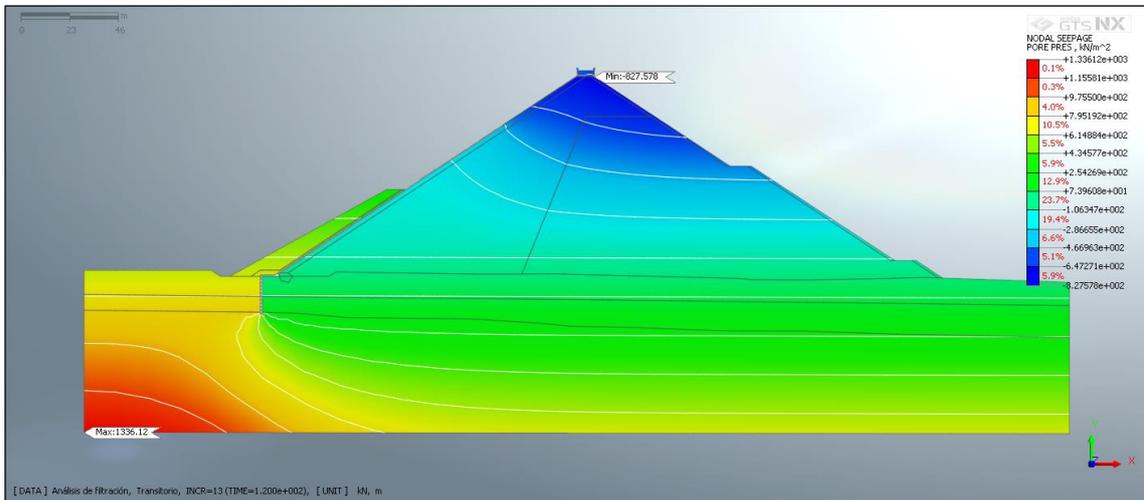
**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=12 (TIME=9.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png**



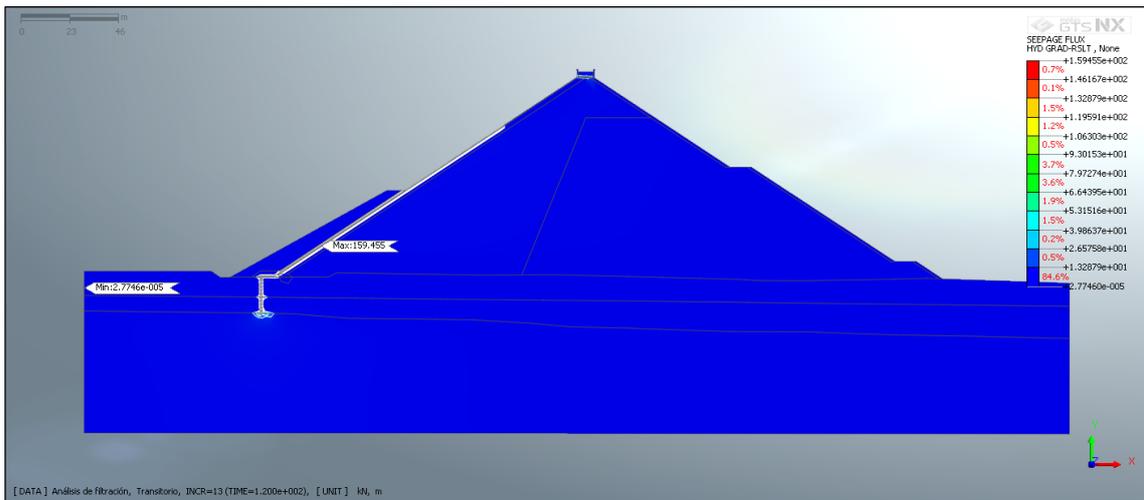
**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Nodal Seepage
Results_TOTAL HEAD_Current.png**



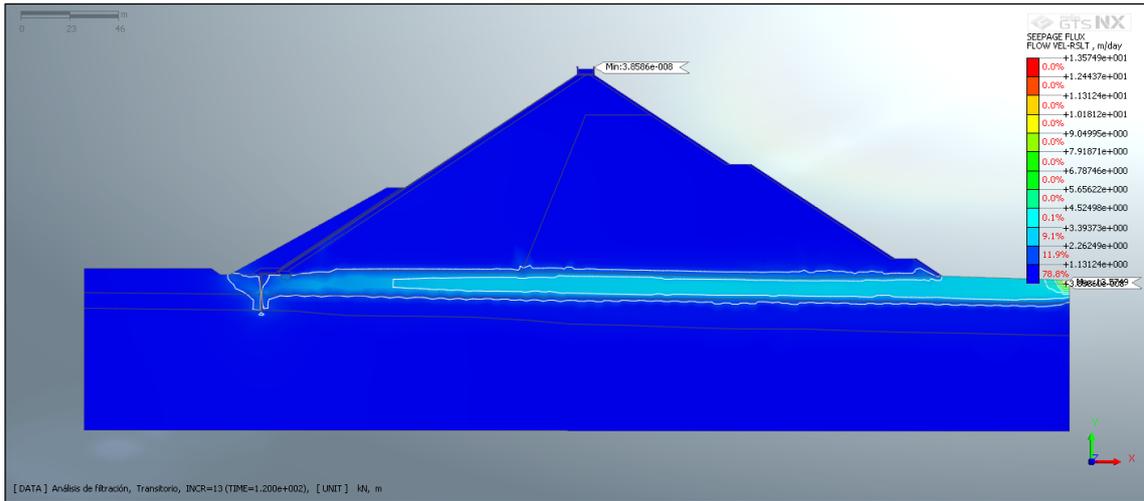
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



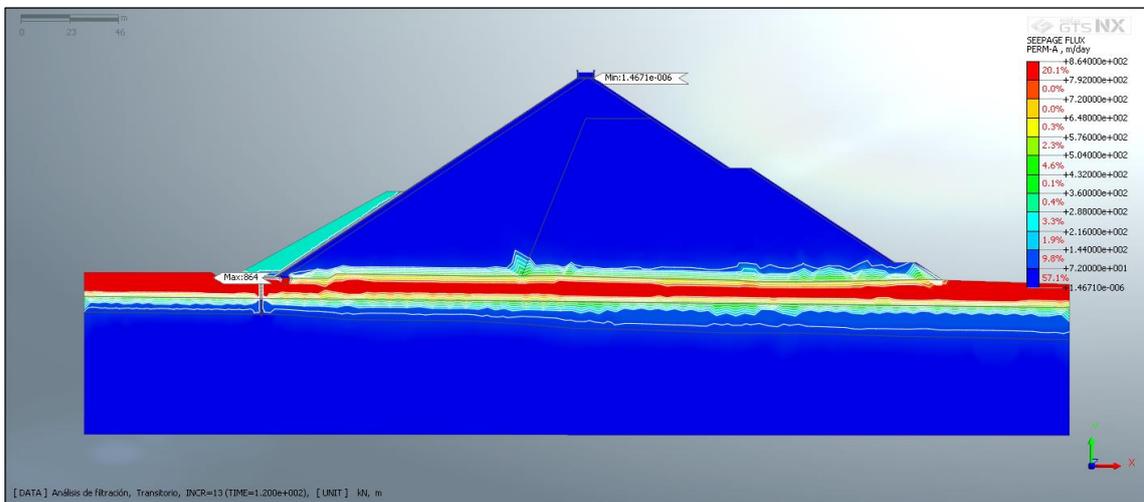
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



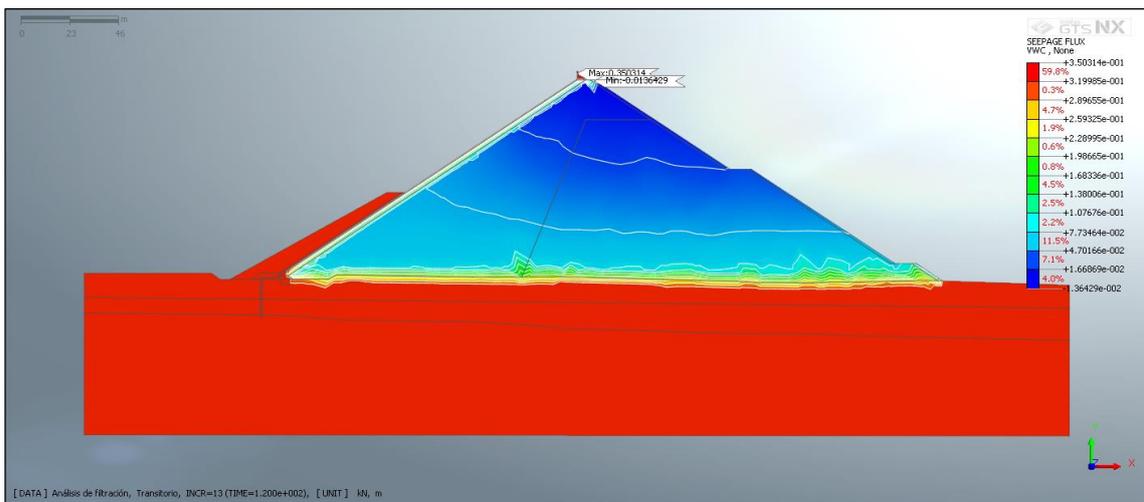
Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



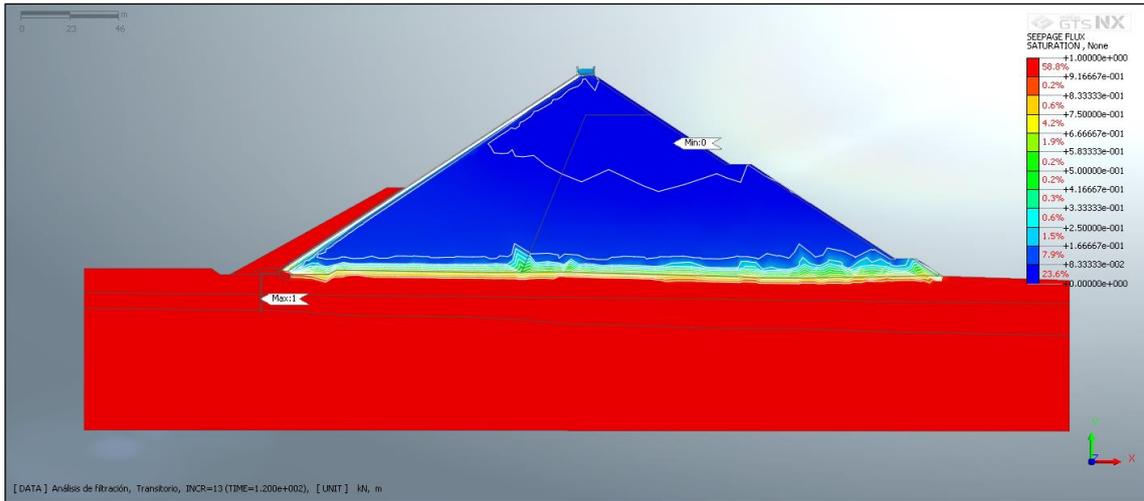
**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png**



**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png**

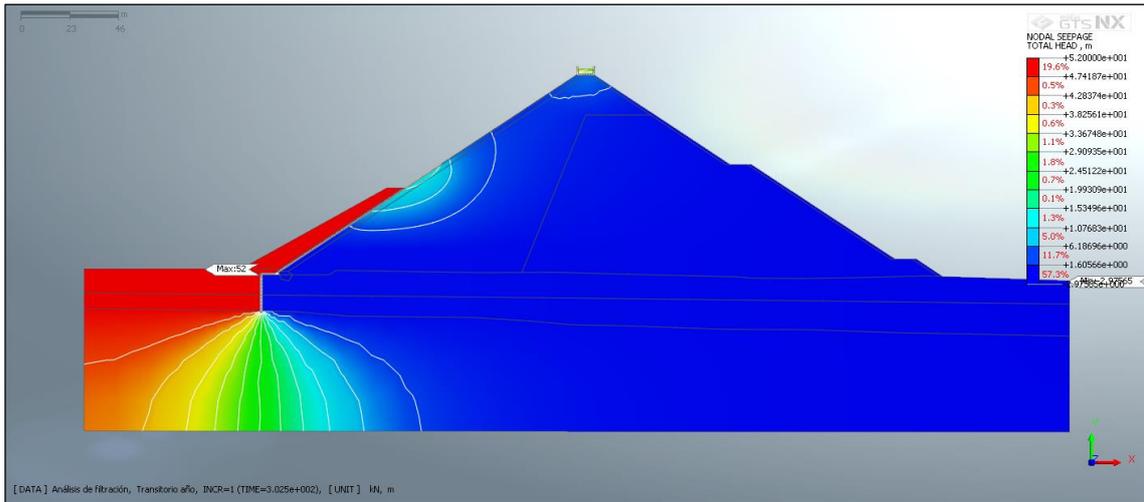


**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png**

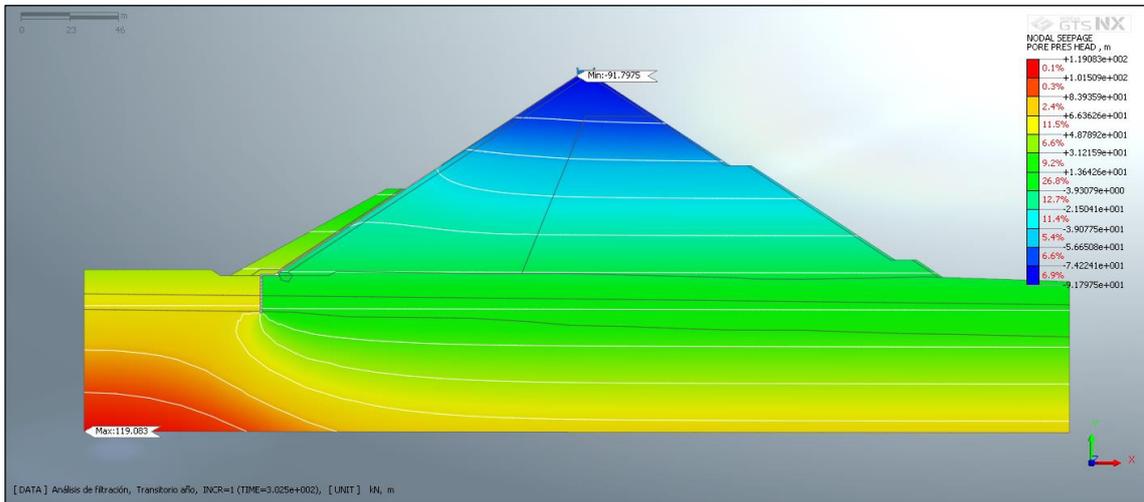


**Análisis de filtración_Transitorio_INCR=13 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png**

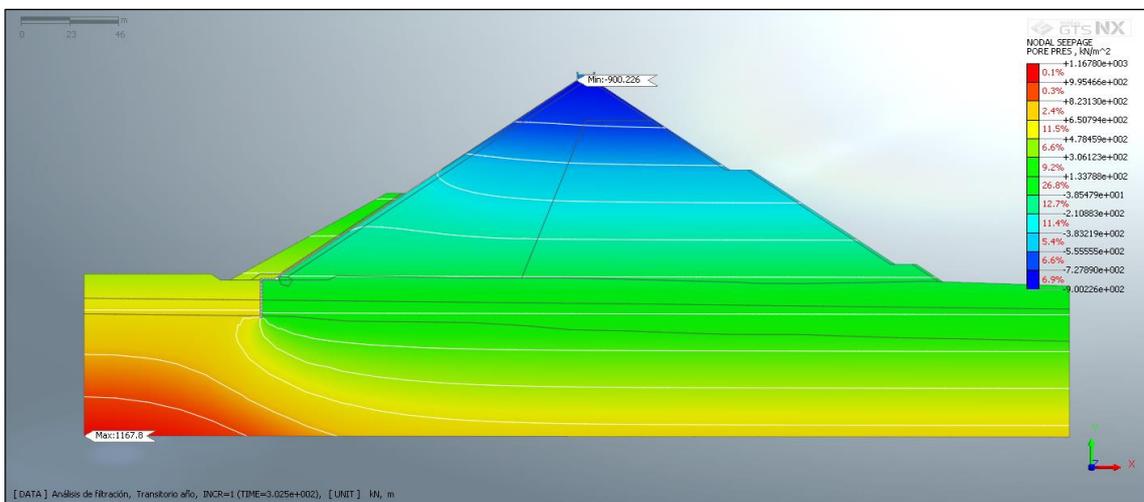
Escenario Transitorio Año - Filtración



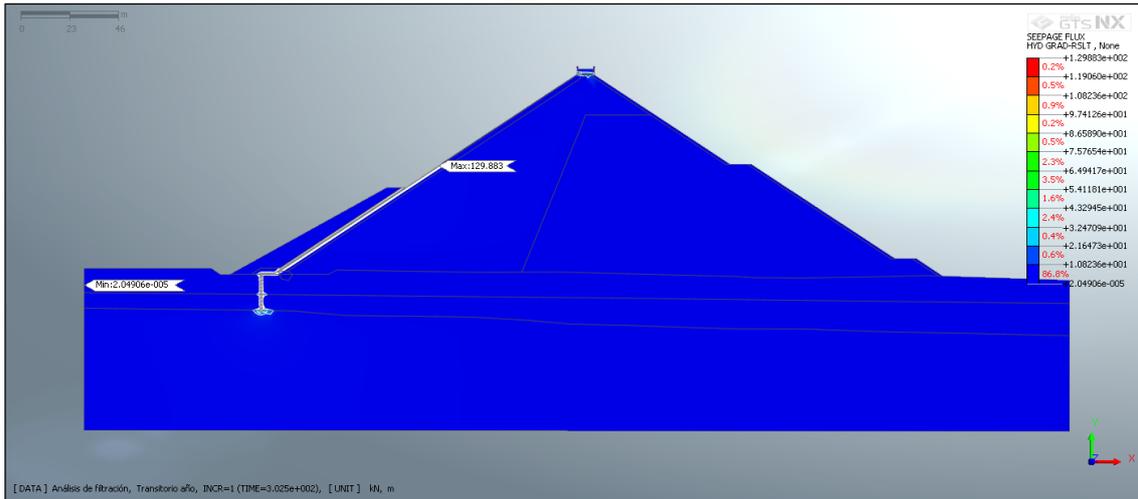
Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



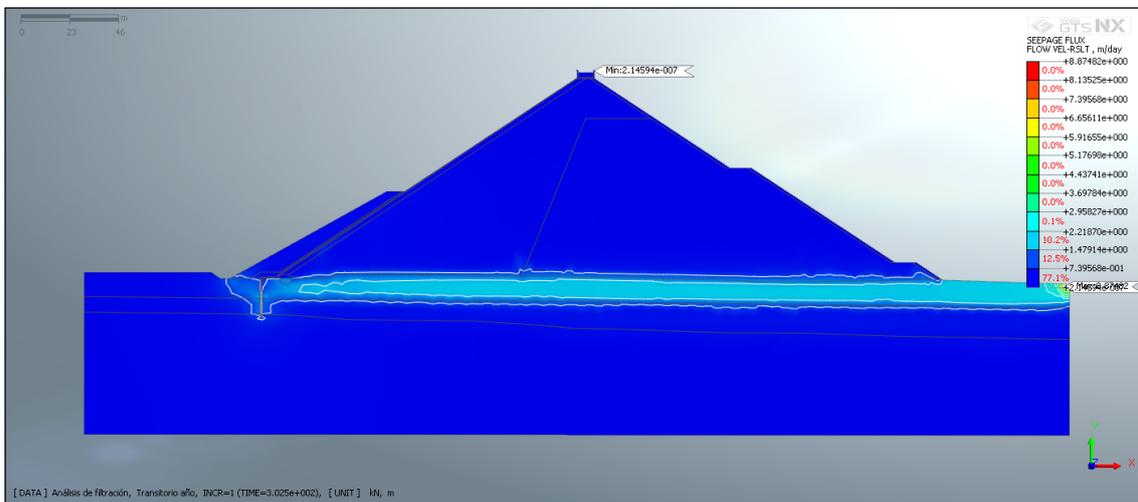
Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



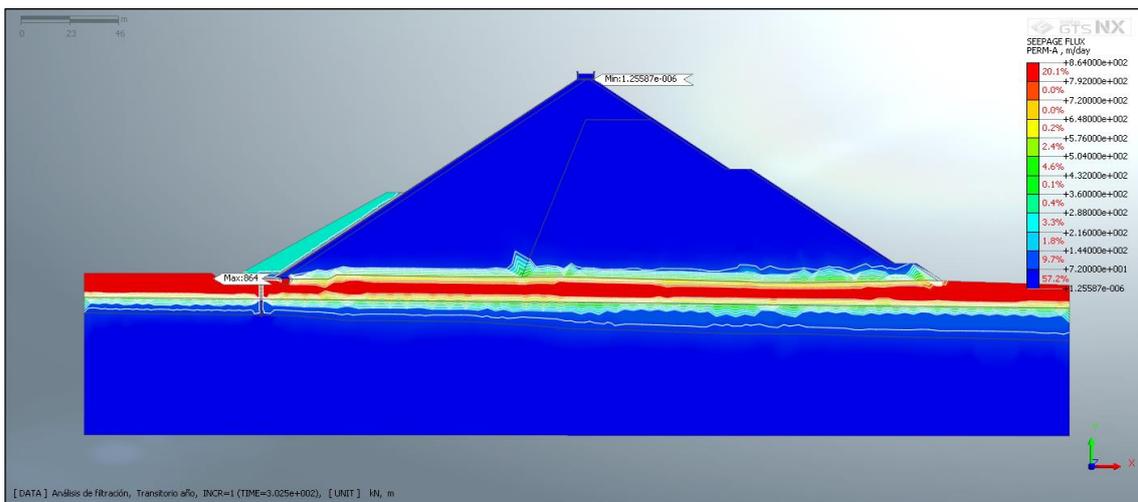
Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



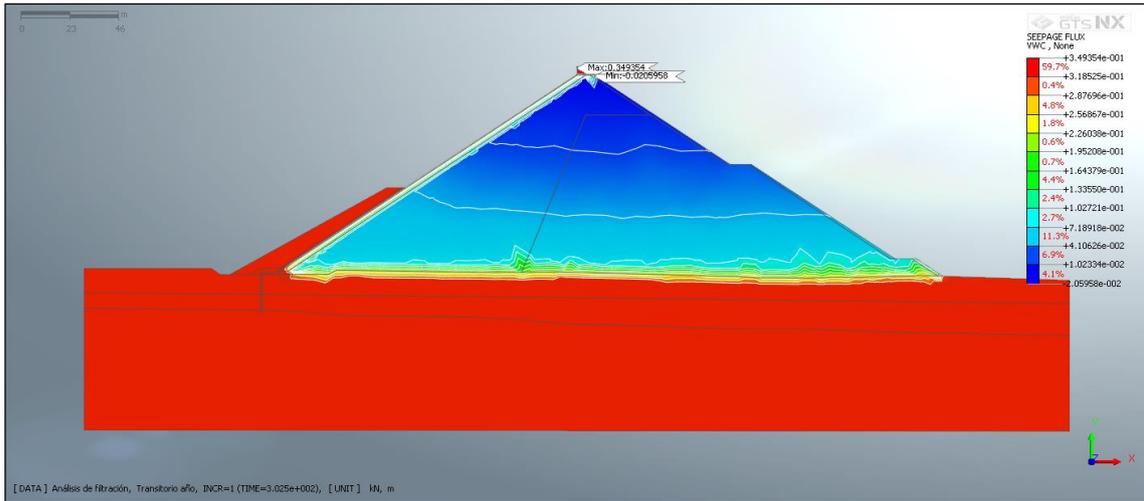
**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png**



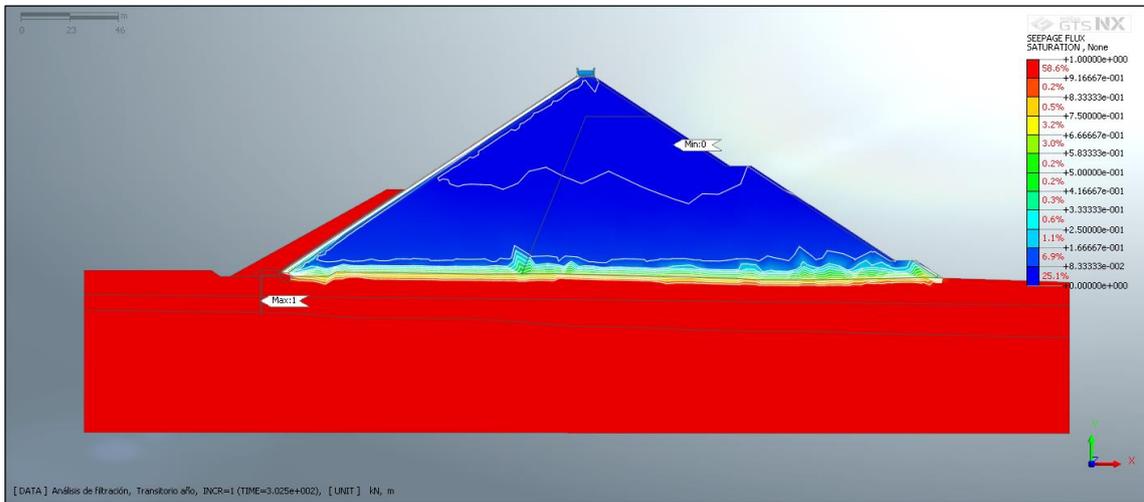
**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png**



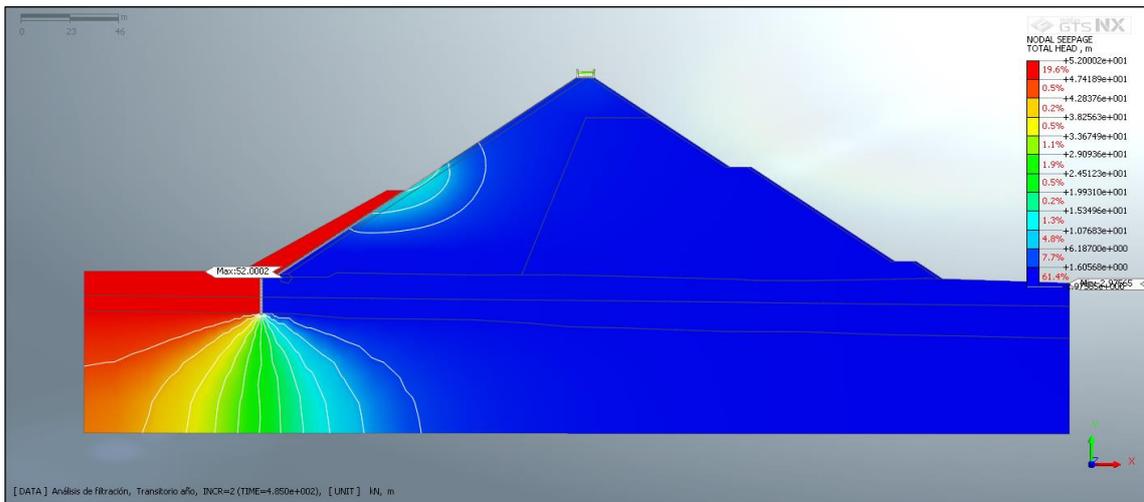
**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png**



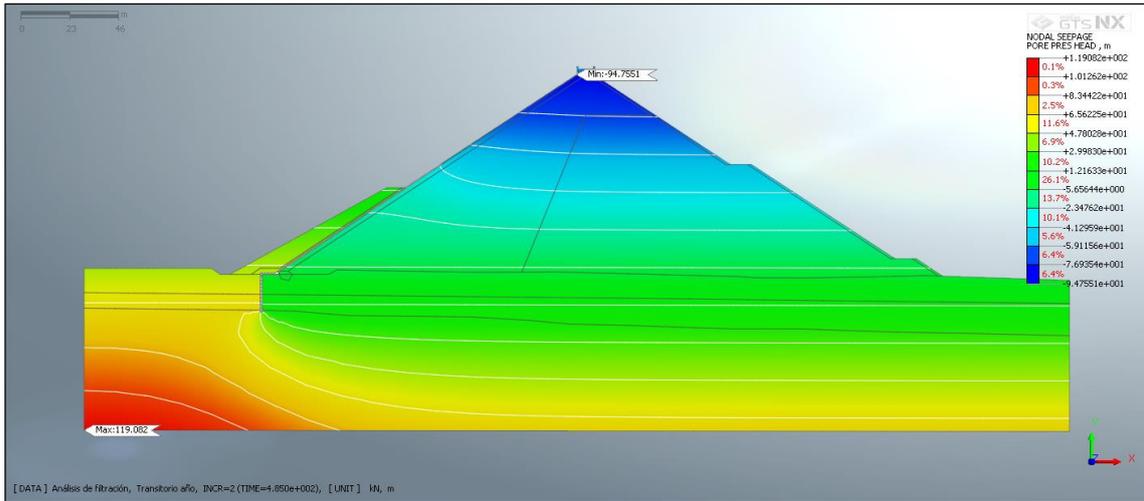
**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png**



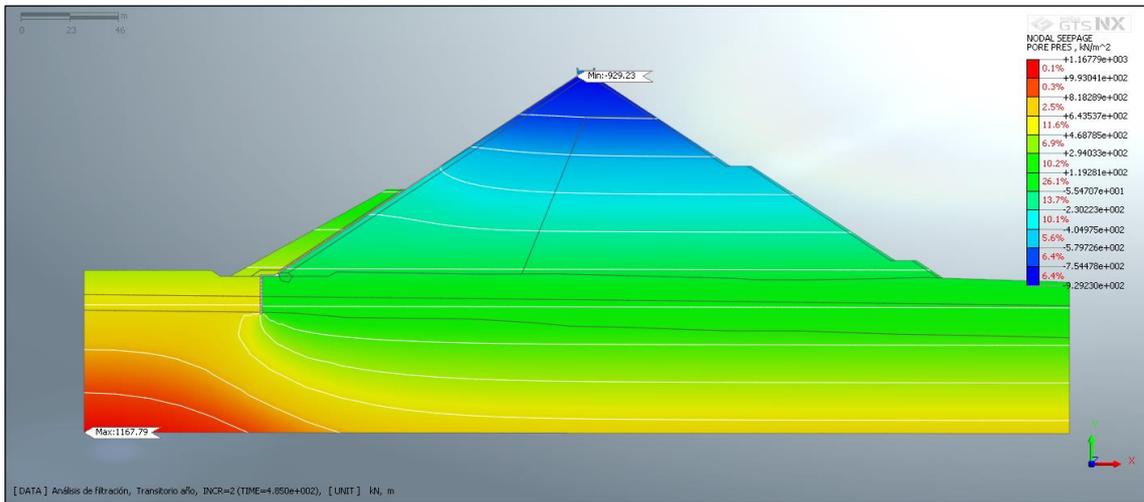
**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png**



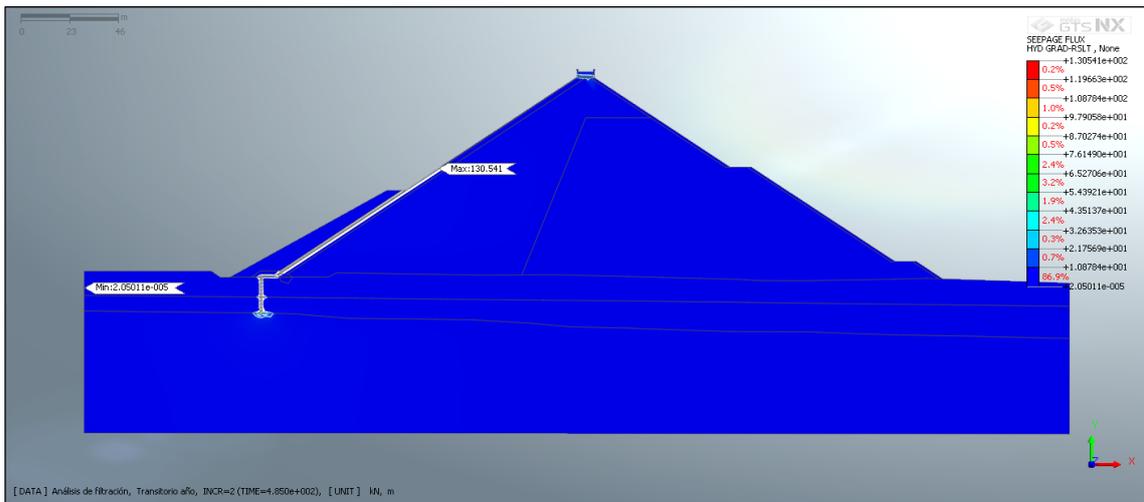
**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Nodal Seepage
Results_TOTAL HEAD_Current.png**



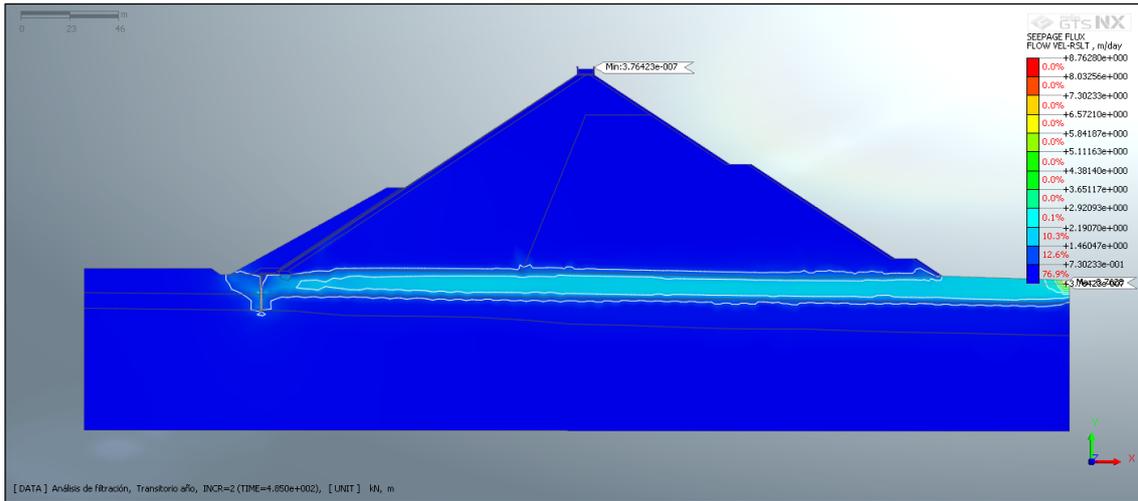
Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



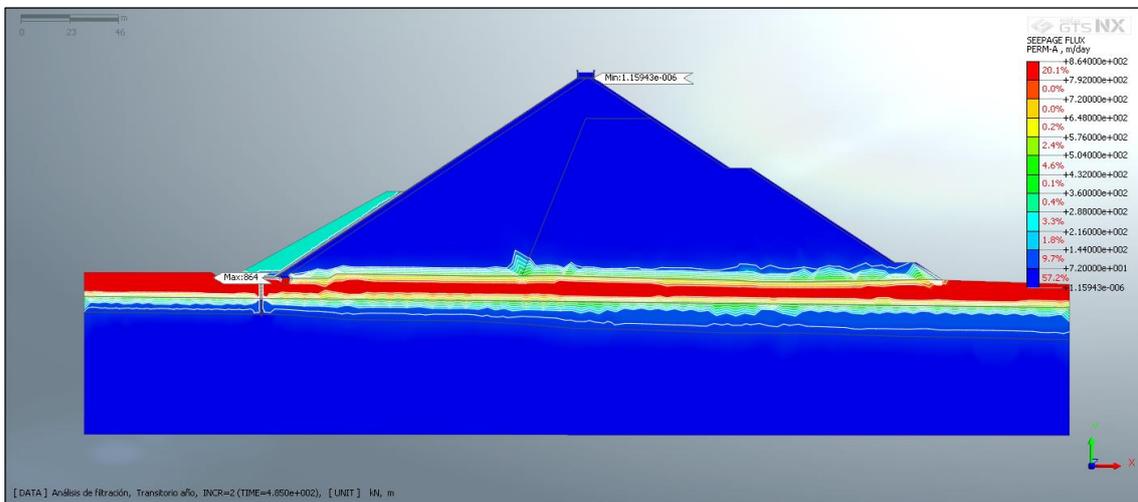
Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



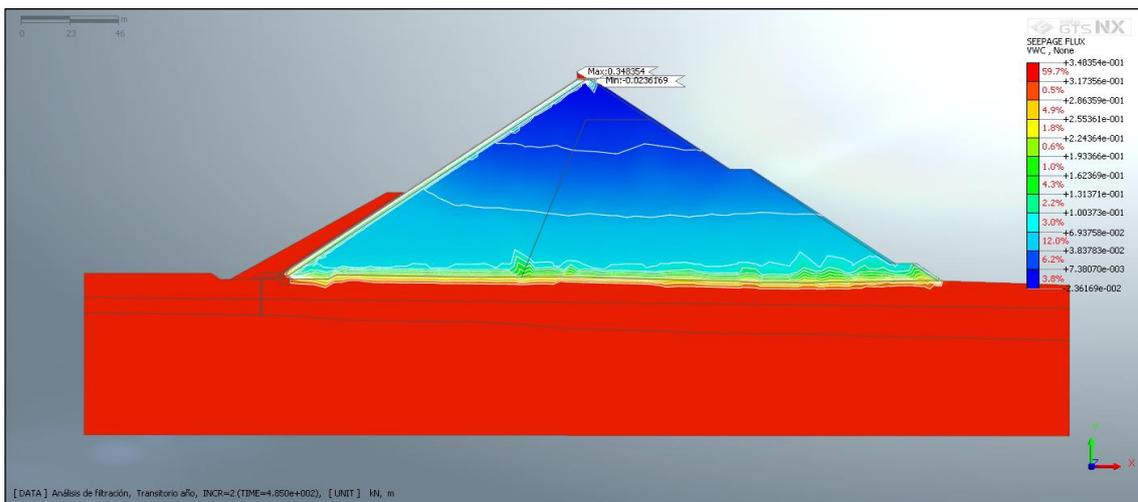
Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



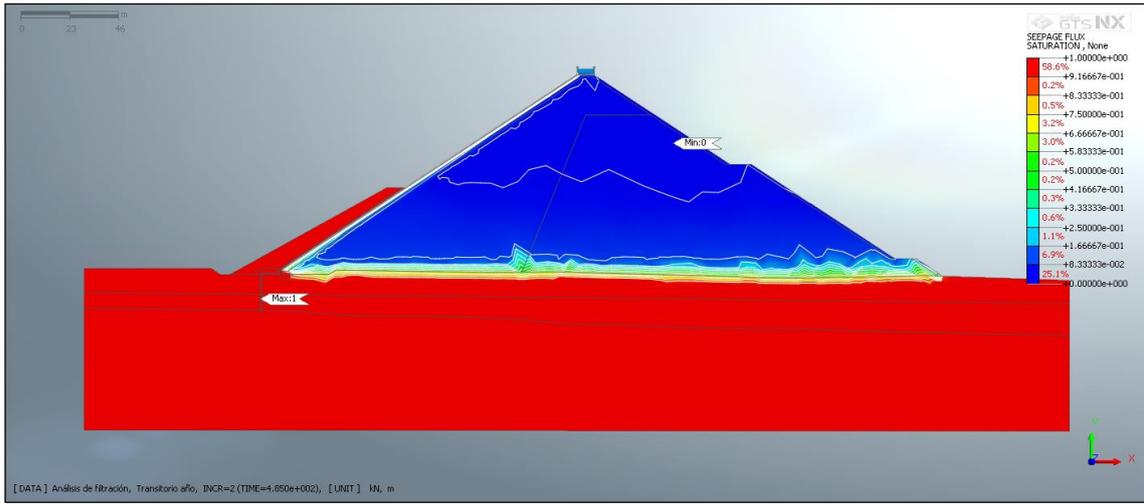
**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_ SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png**



**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png**

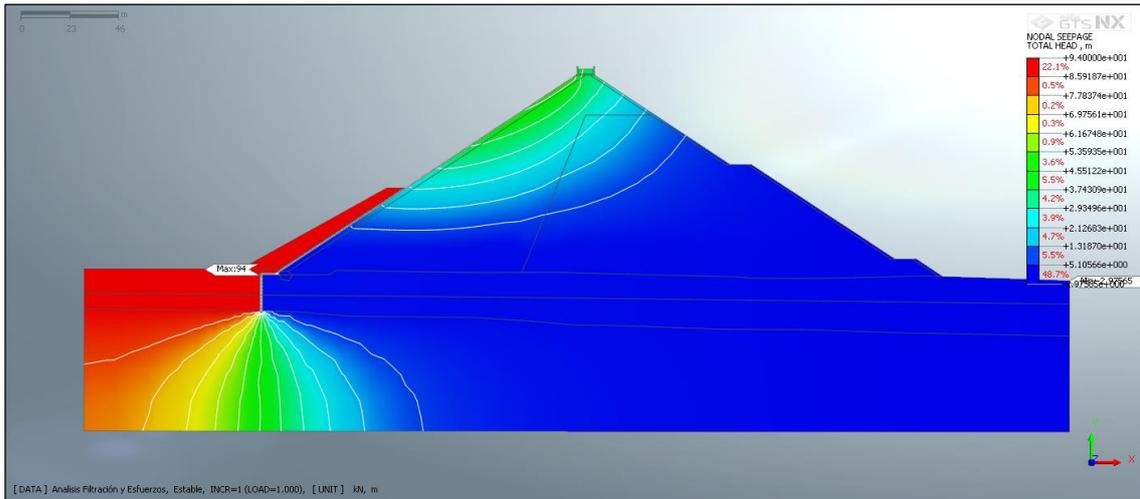


**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png**

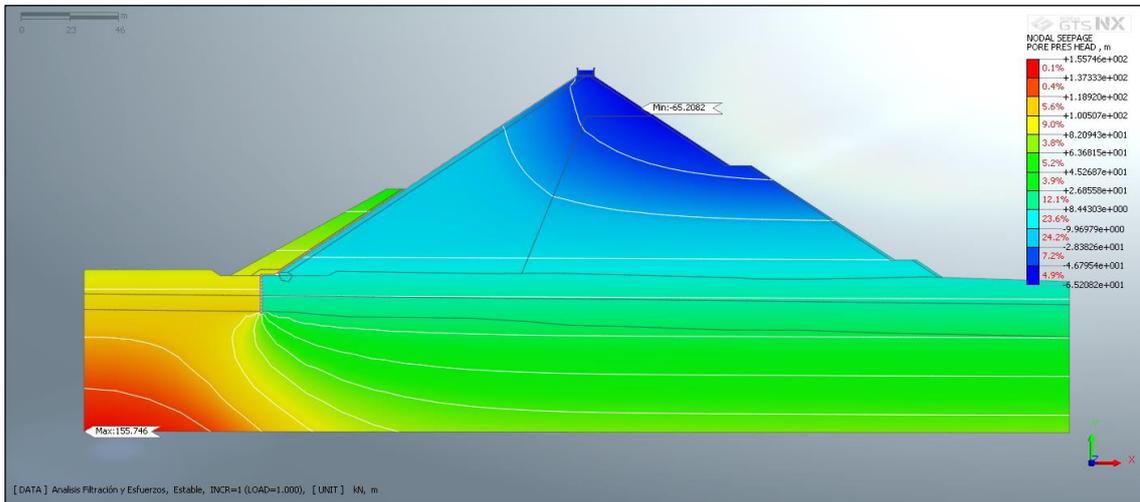


**Análisis de filtración_Transitorio año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png**

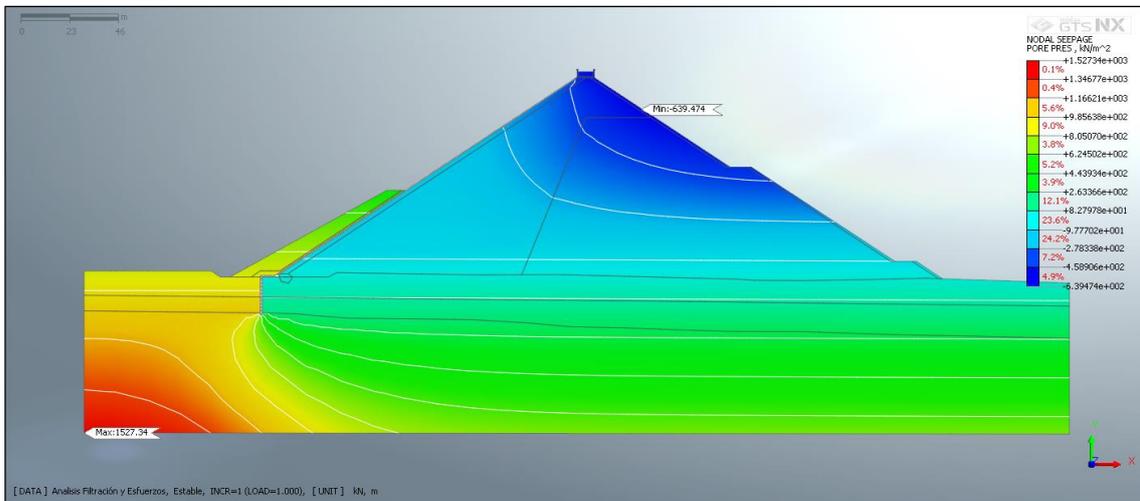
Escenario Estable - Estabilidad



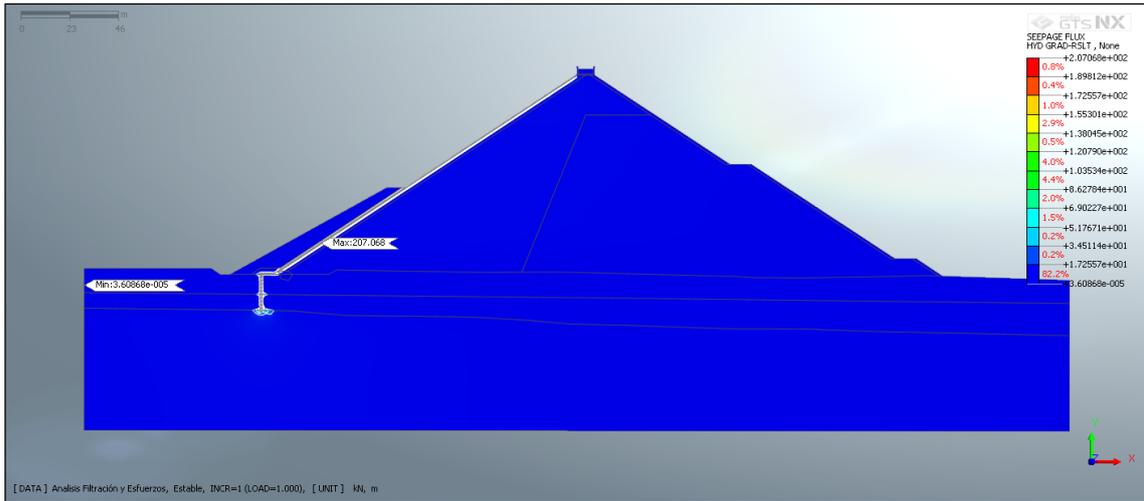
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



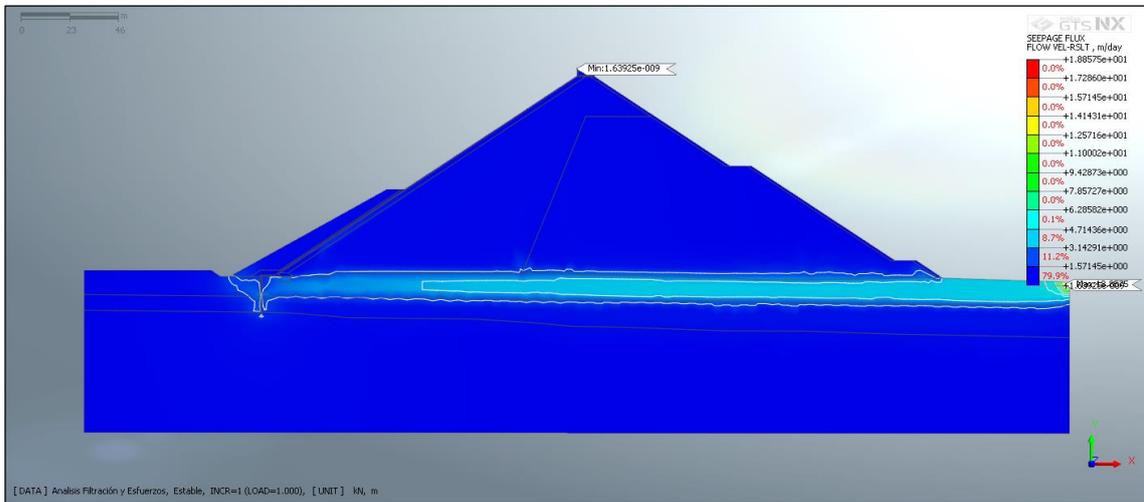
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



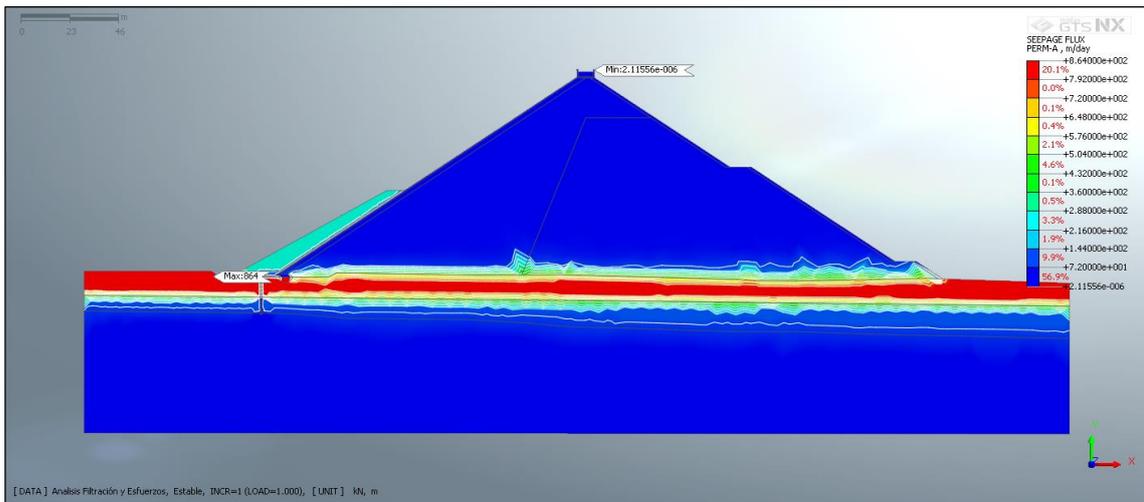
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



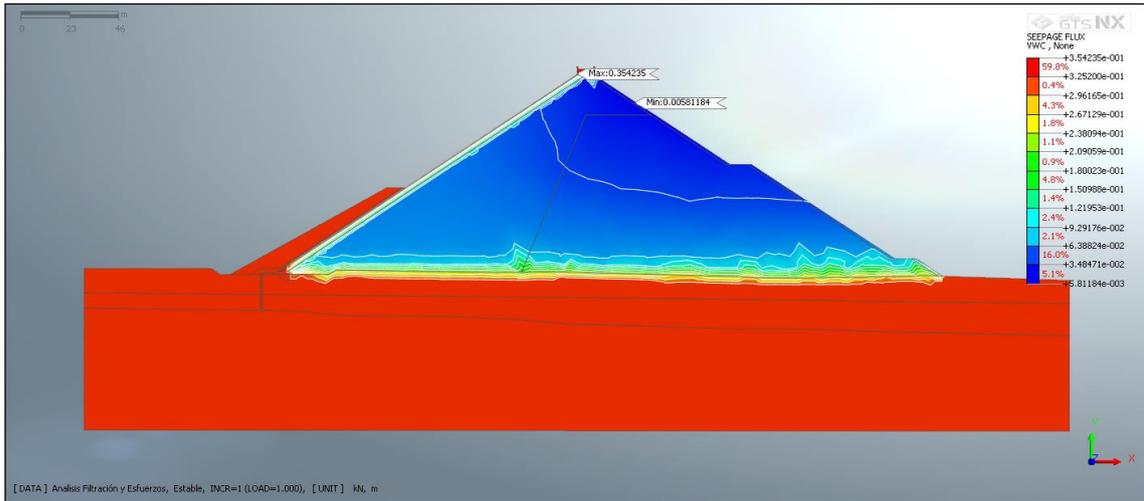
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



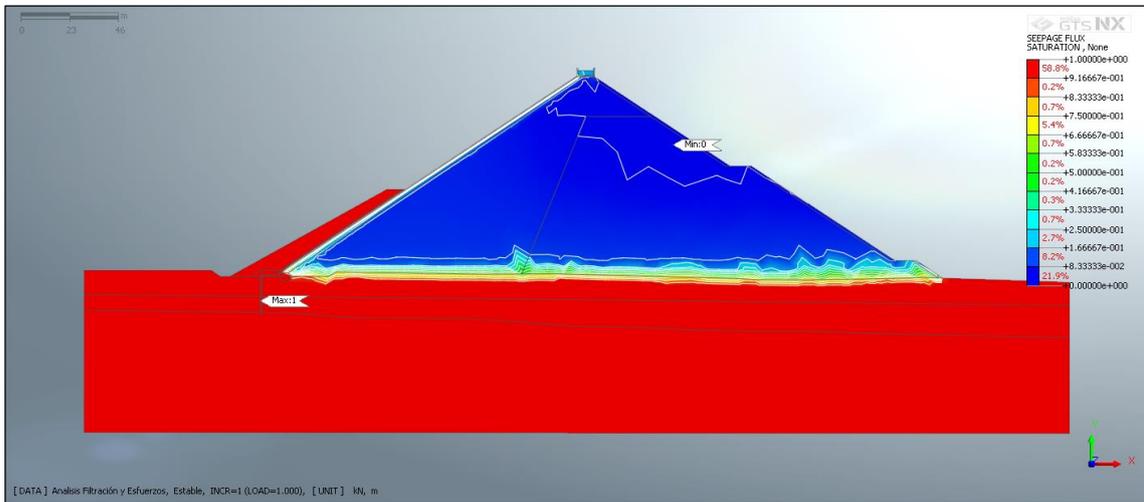
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png

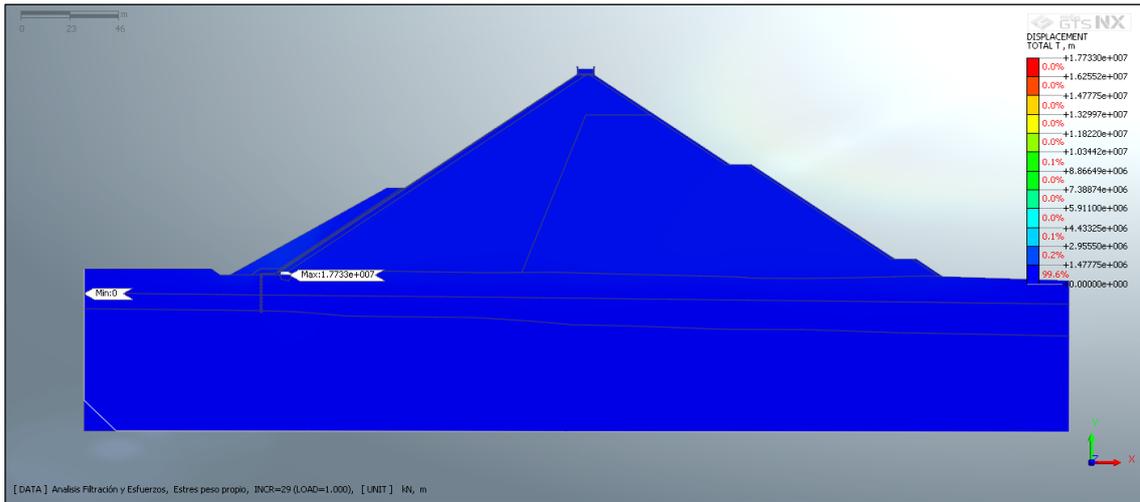


**Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain
Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png**

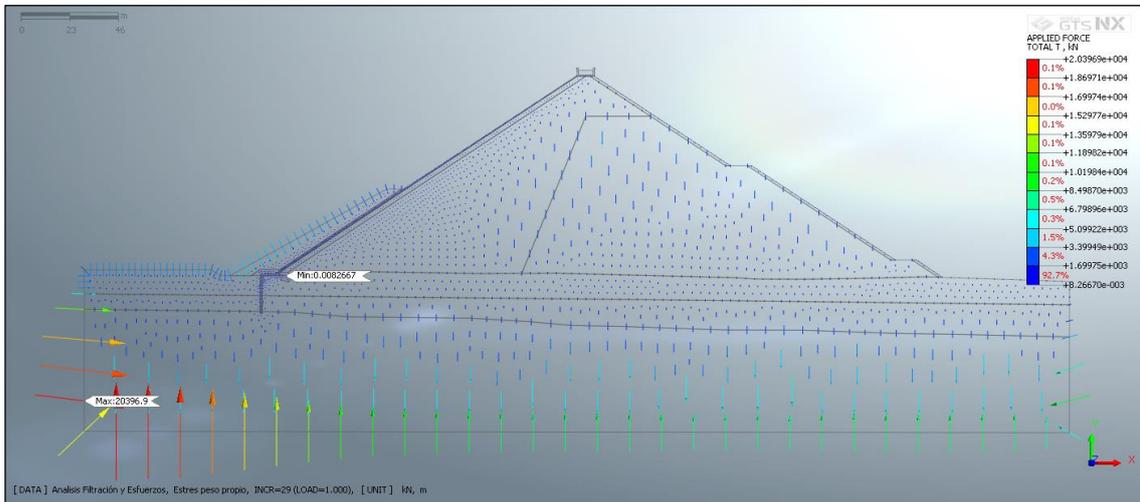


**Analisis Filtración y Esfuerzos_Estable_INCR=1 (LOAD=1.000)_Plane Strain
Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png**

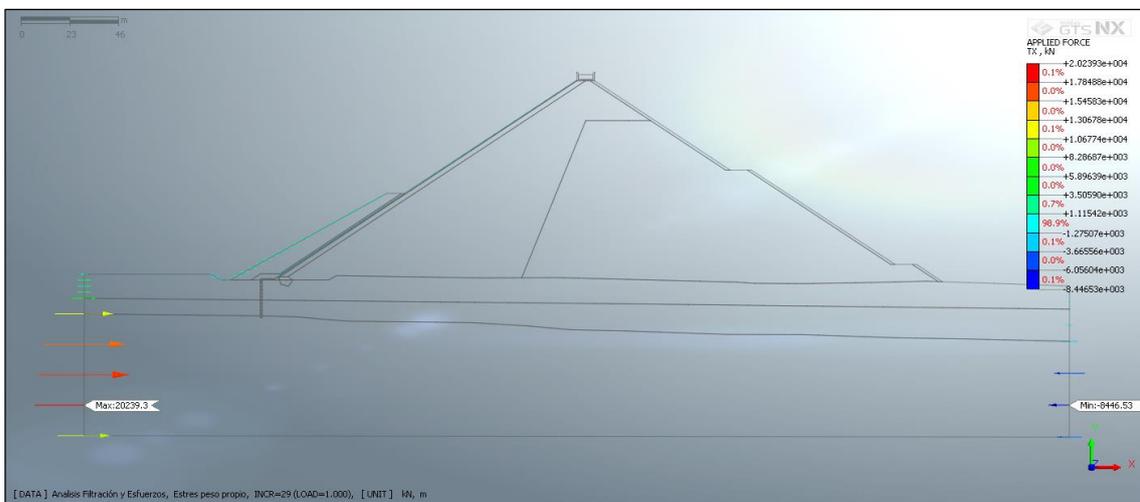
Escenario Transitorio - Estabilidad



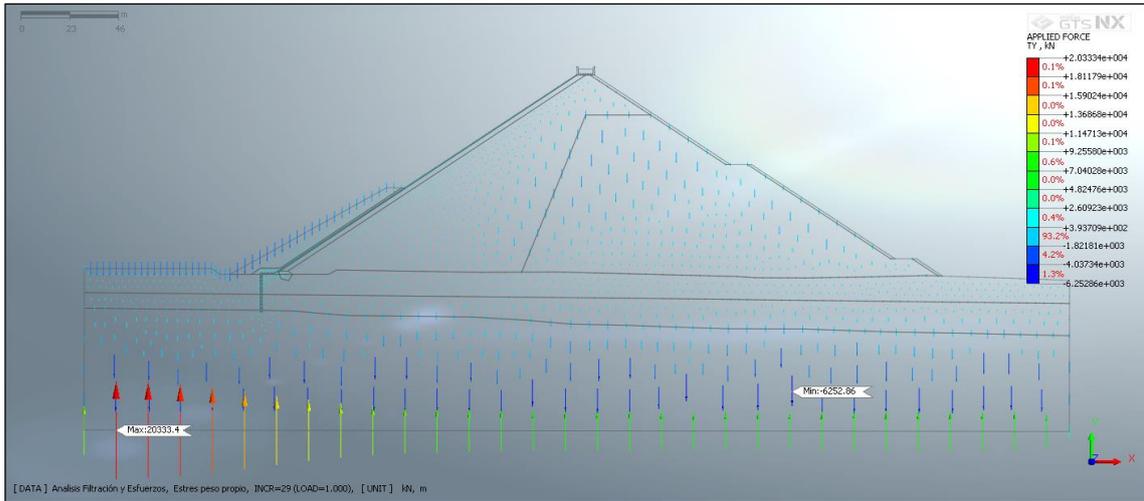
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Displacements_TOTAL TRANSLATION (V)_Current.png



Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TOTAL APPLIED FORCE_Current.png



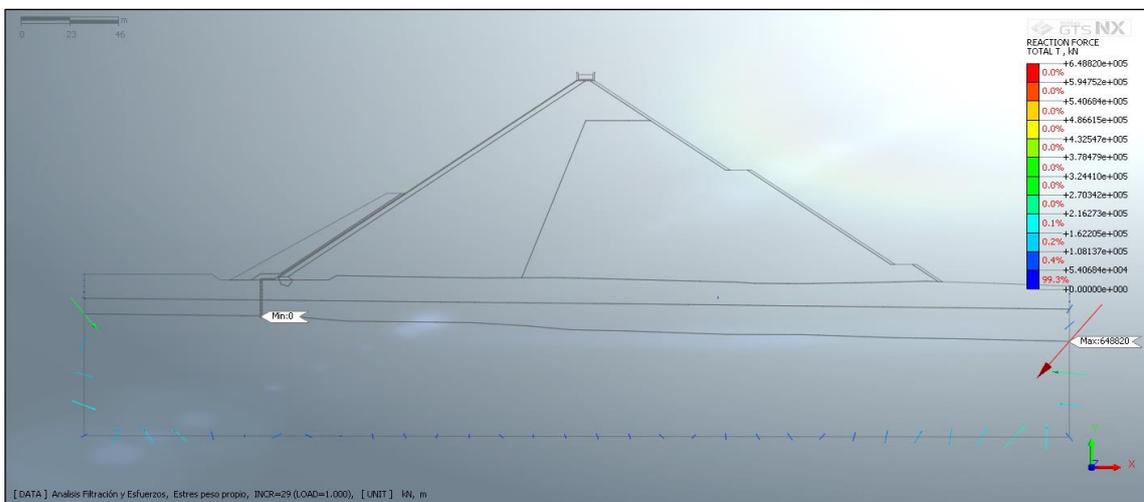
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TX APPLIED FORCE_Current.png



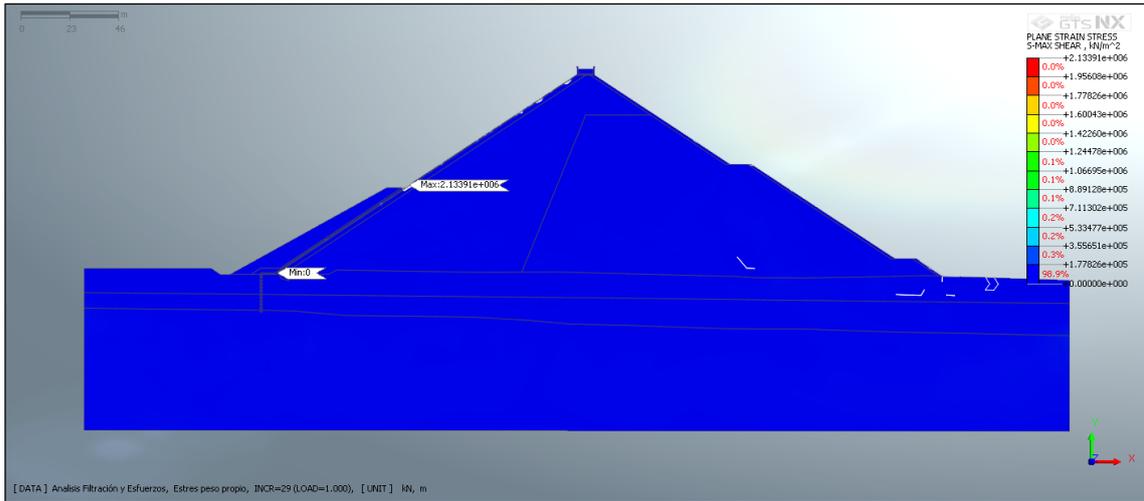
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TY APPLIED FORCE_Current.png



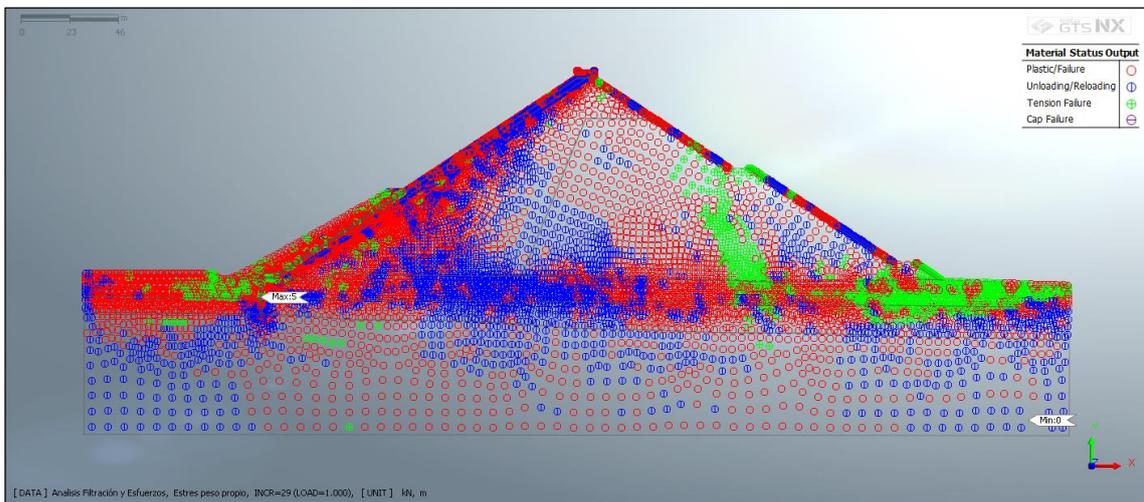
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TOTAL APPLIED MOMENT_Current.png
=1.000)_Grid Forces_RY APPLIED MOMENT_Current.png**



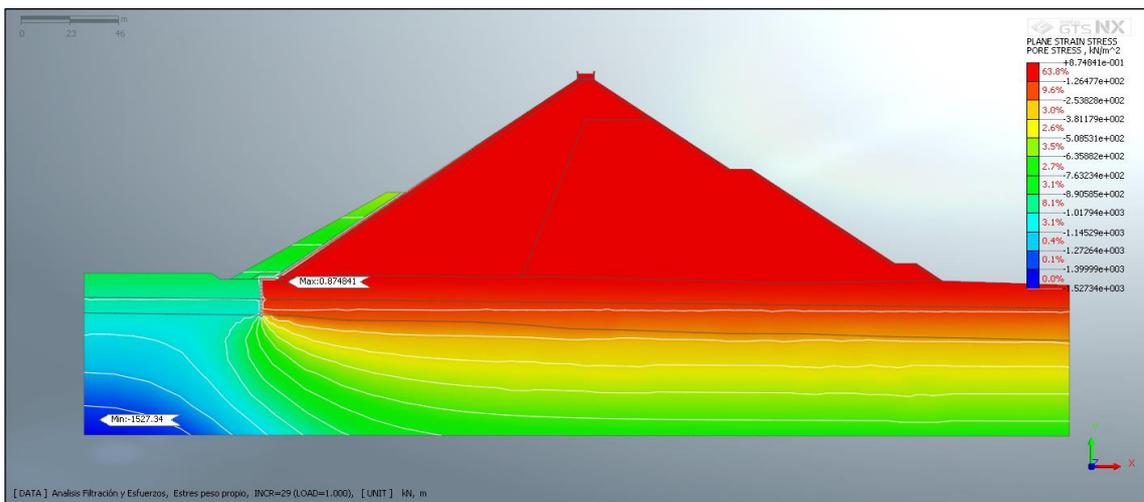
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Reactions_TOTAL REACTION FORCE_Current.png



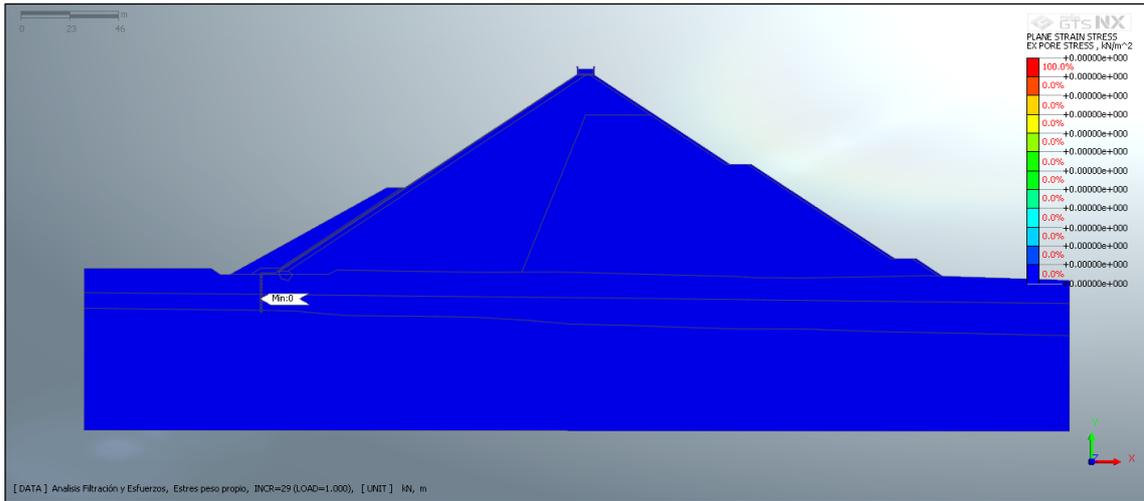
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_S-MAX SHEAR_Current.png



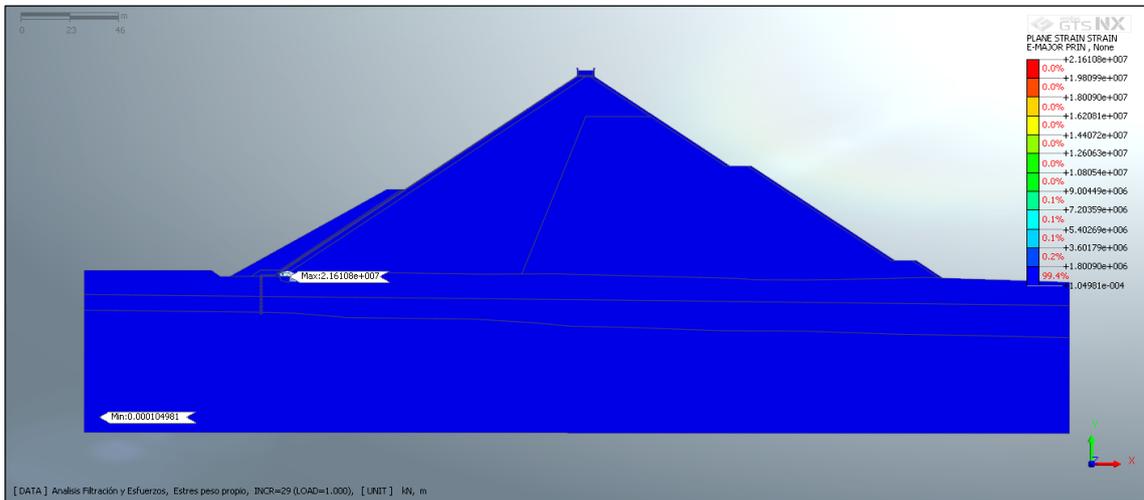
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_PLASTIC STATUS_Current.png



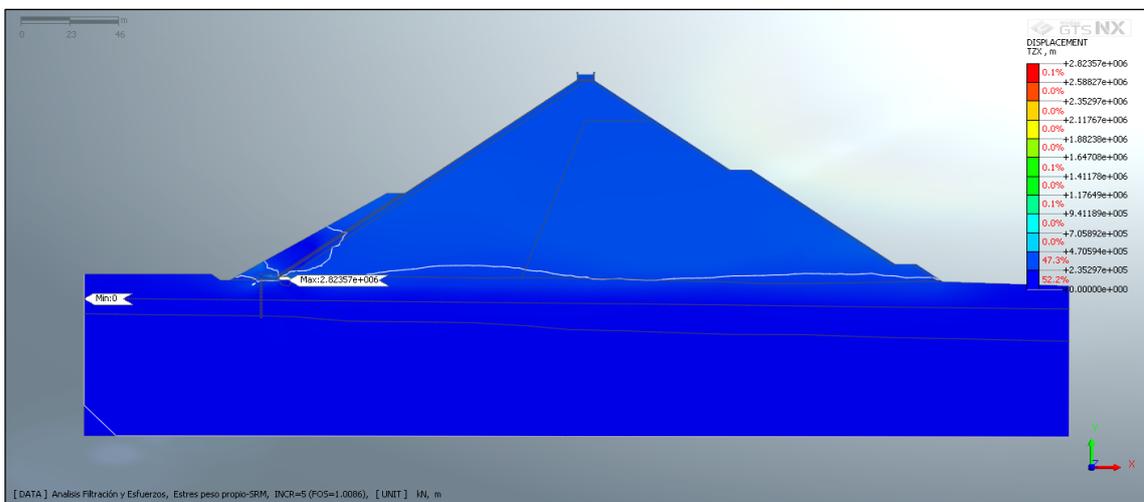
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_PORE STRESS_Current.png



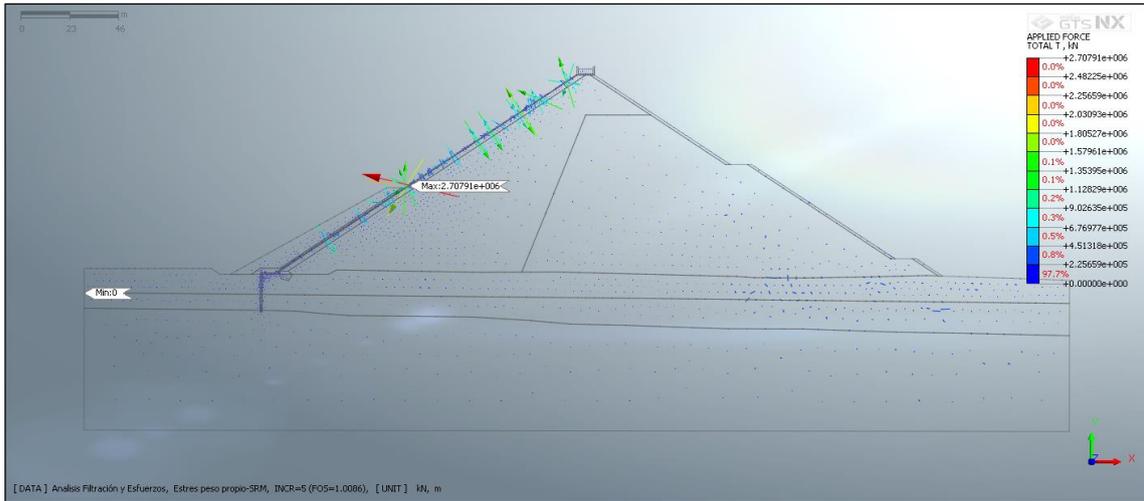
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_EXCESSIVE PORE STRESS_Current.png



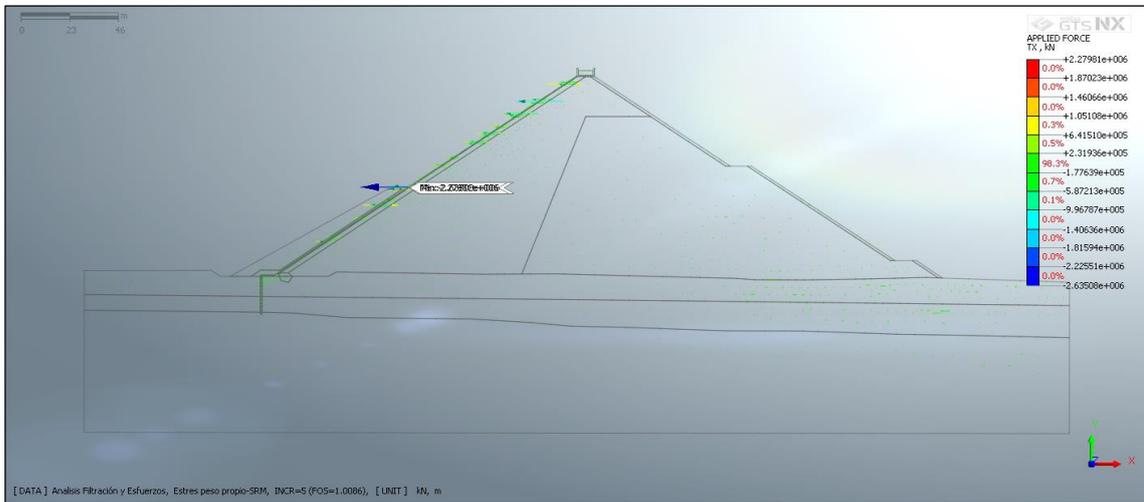
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio_INCR=29 (LOAD=1.000)_Plane Strain Strains_E-MAJOR PRINCIPAL (V)_Current.png (FOS=1.086)_Displacements_TXY TRANSLATION (V)_Current.png



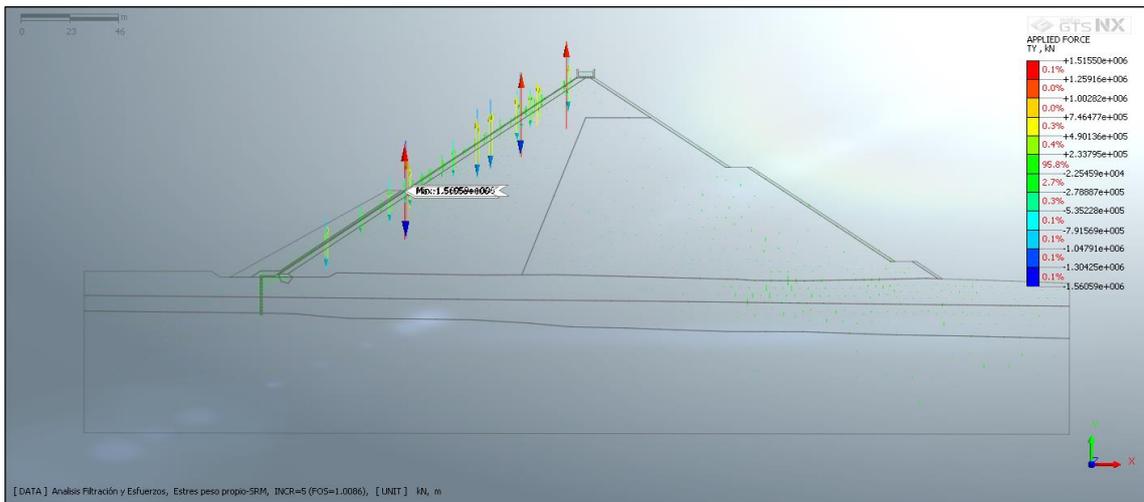
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.086)_Displacements_TZX TRANSLATION (V)_Current.png



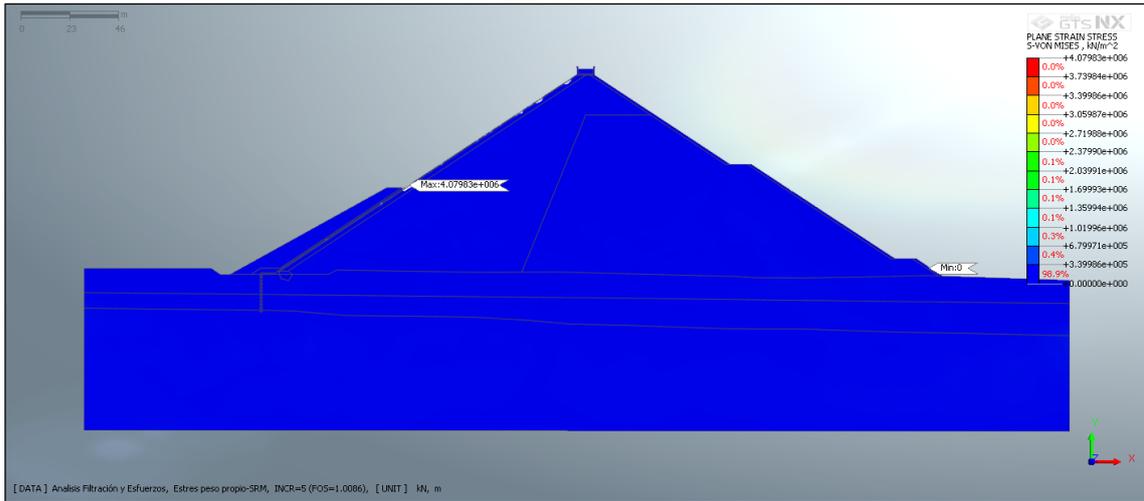
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estrés peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.086)_Grid Forces_TOTAL APPLIED FORCE_Current.png



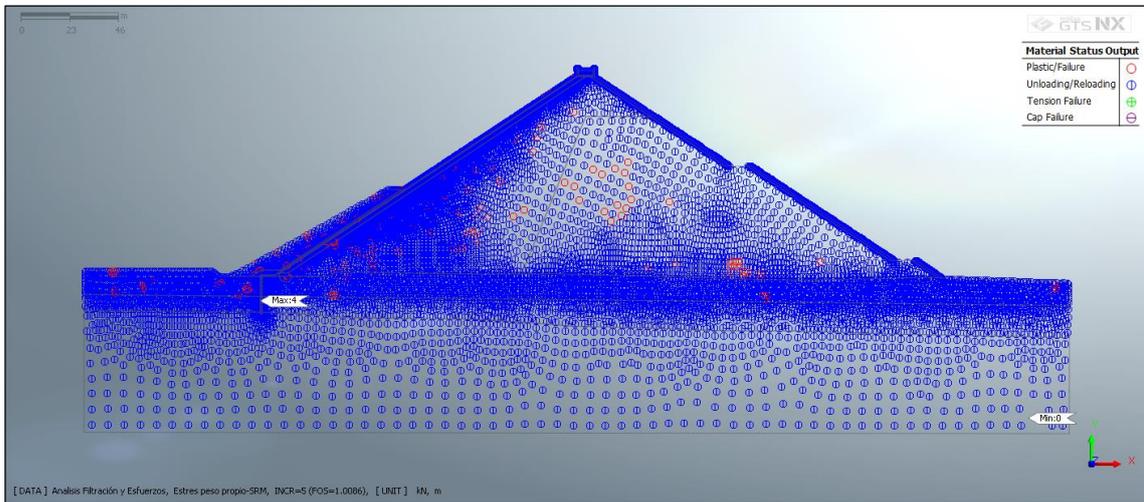
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estrés peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.086)_Grid Forces_TX APPLIED FORCE_Current.png



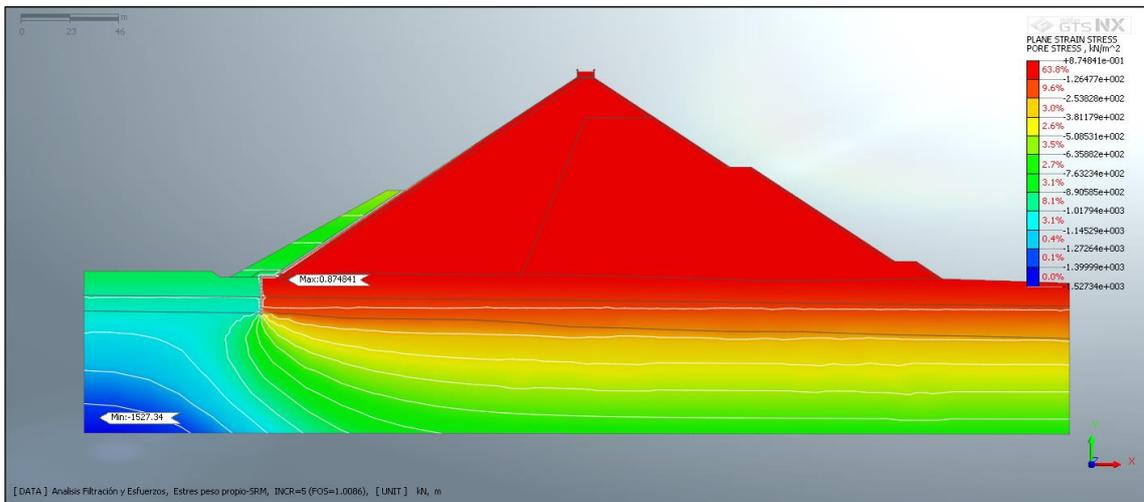
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estrés peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.086)_Grid Forces_TY APPLIED FORCE_Current.png



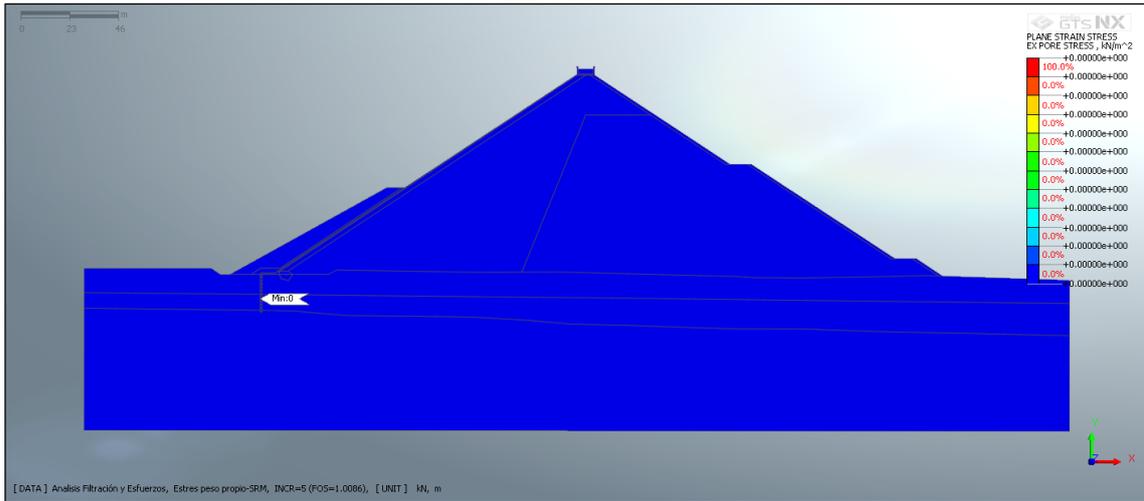
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.006)_Plane Strain Stresses_S-VON MISES_Current.png



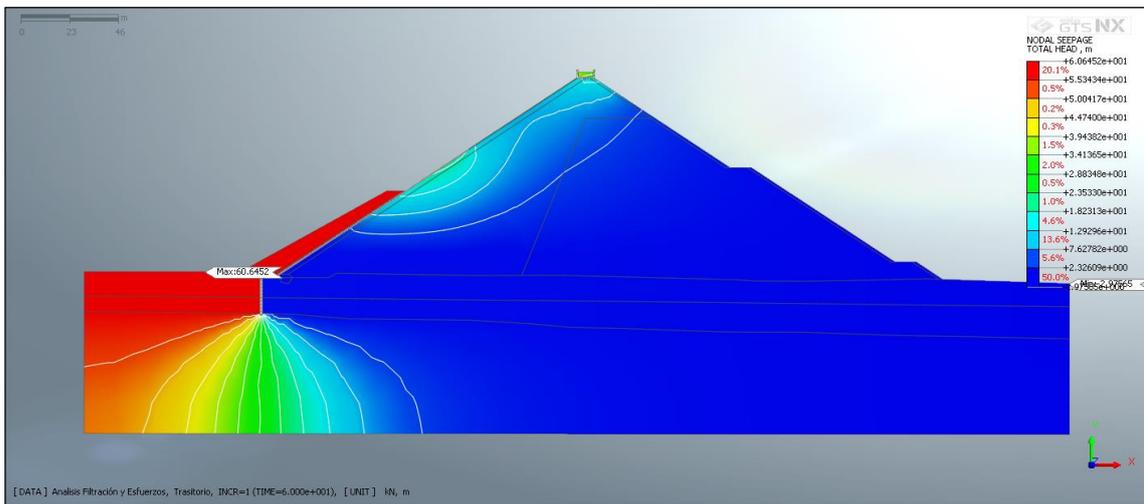
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.086)_Plane Strain Stresses_PLASTIC STATUS_Current.png



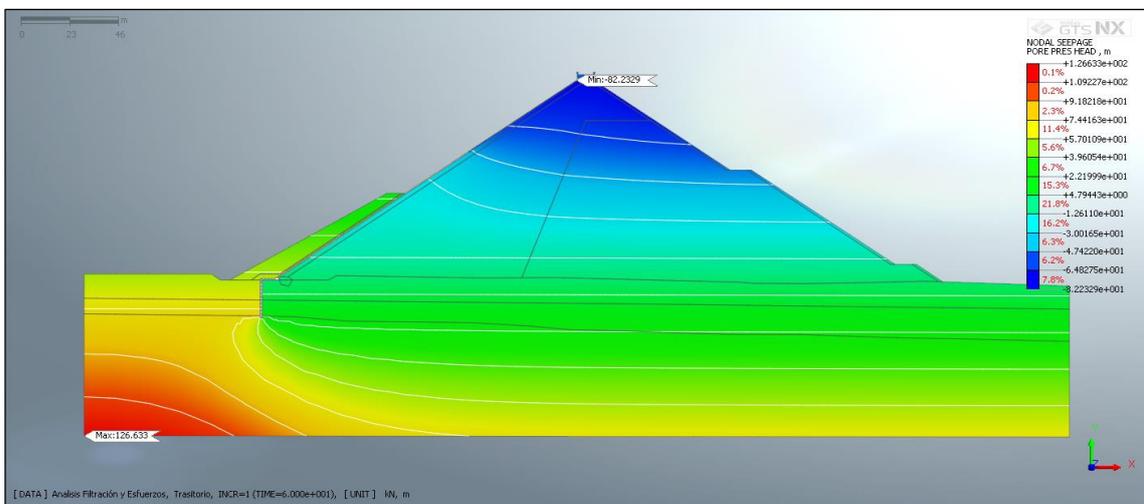
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.086)_Plane Strain Stresses_PORE STRESS_Current.png



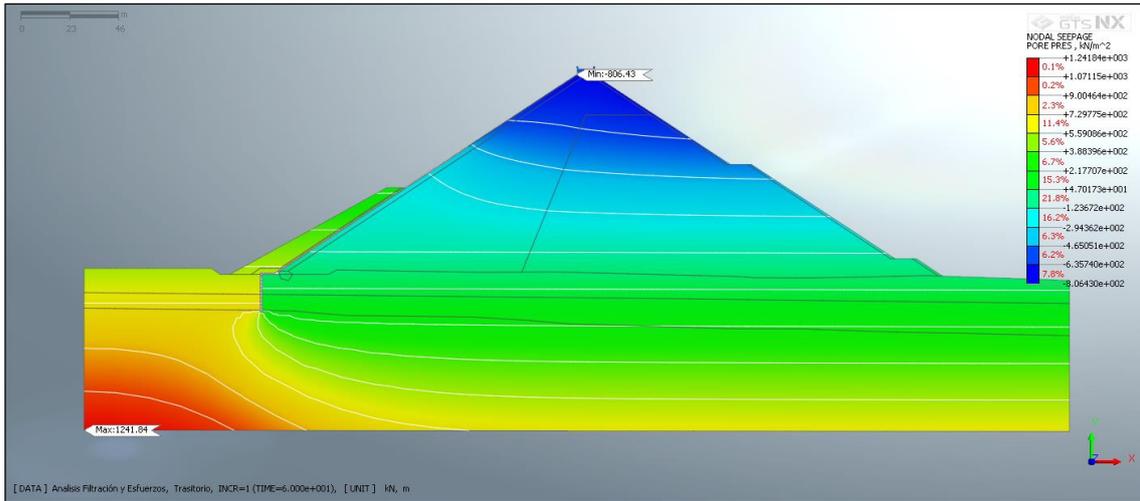
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres peso propio-SRM_INCR=5 (FOS=1.0086)_Plane Strain Stresses_EXCESSIVE PORE STRESS_Current.png



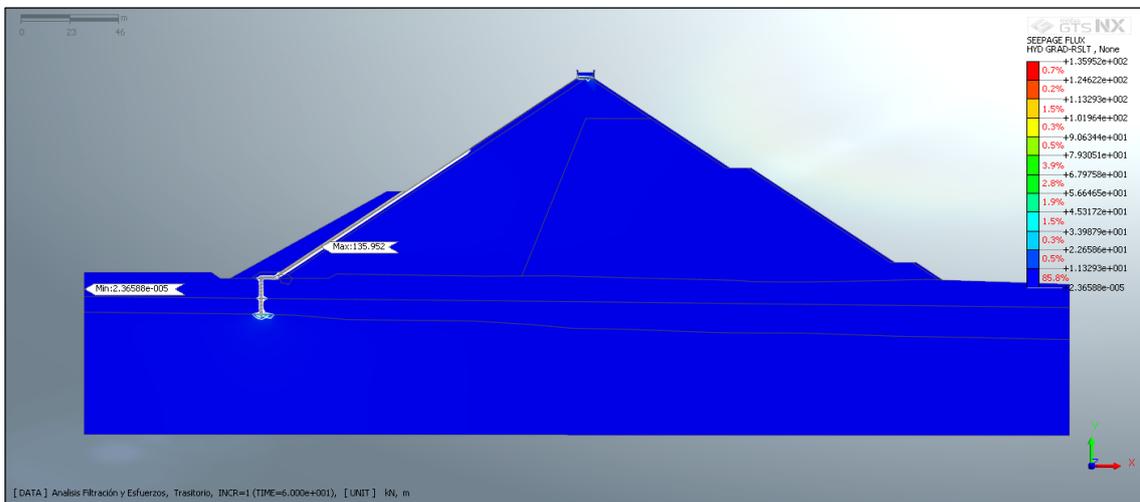
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



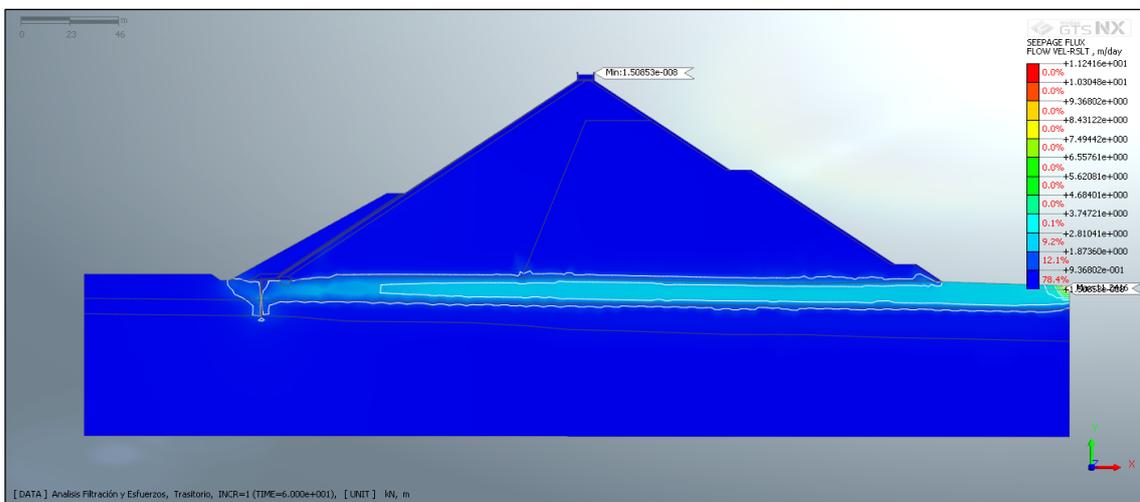
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



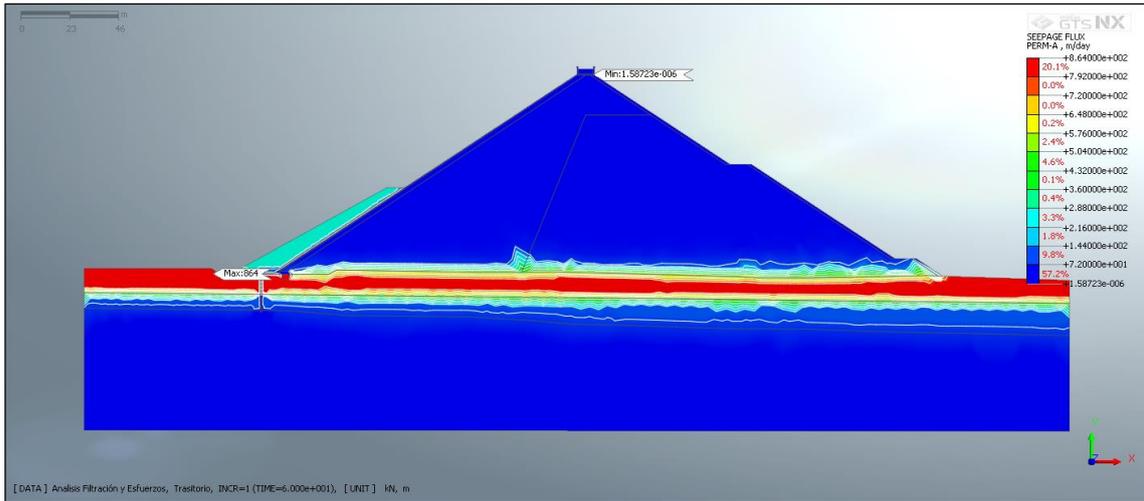
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



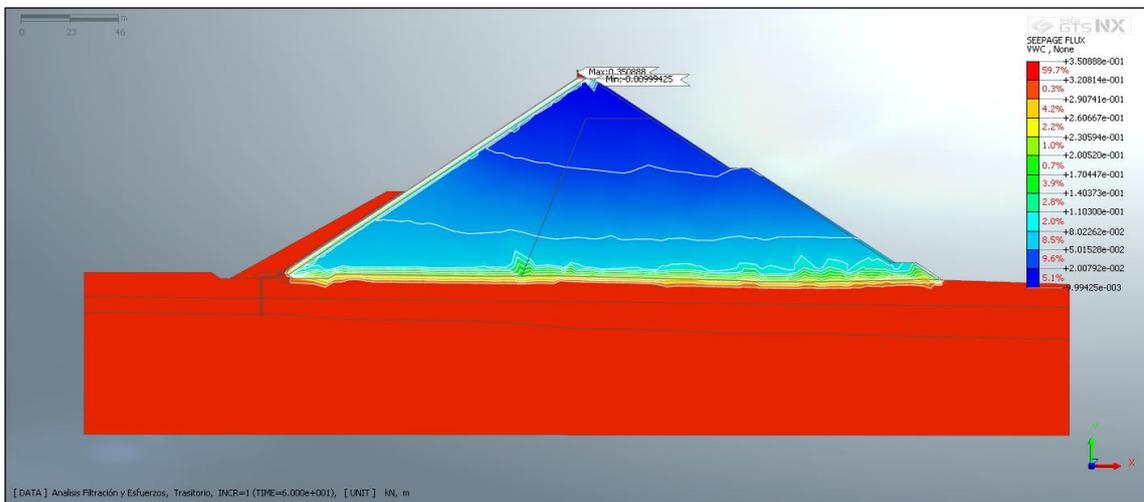
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



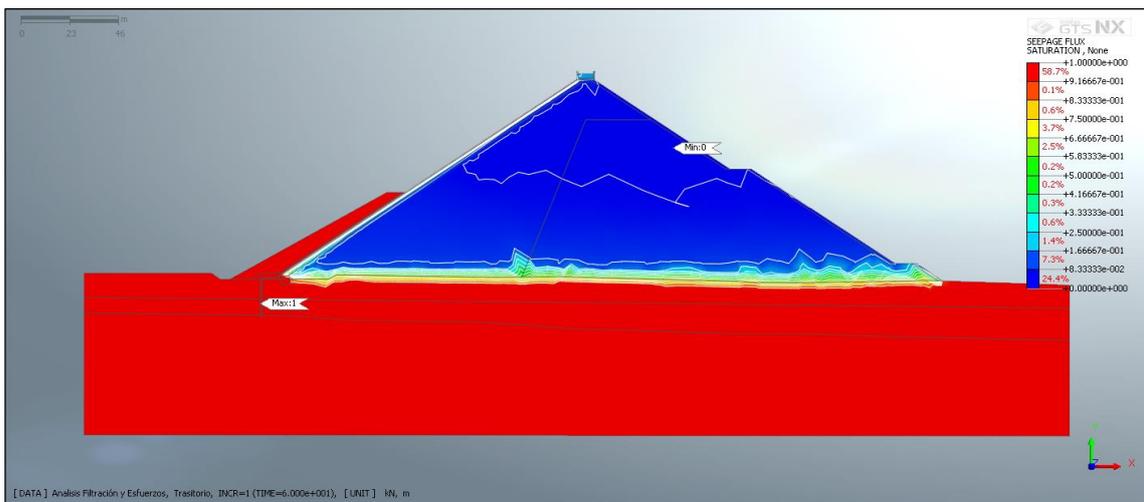
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



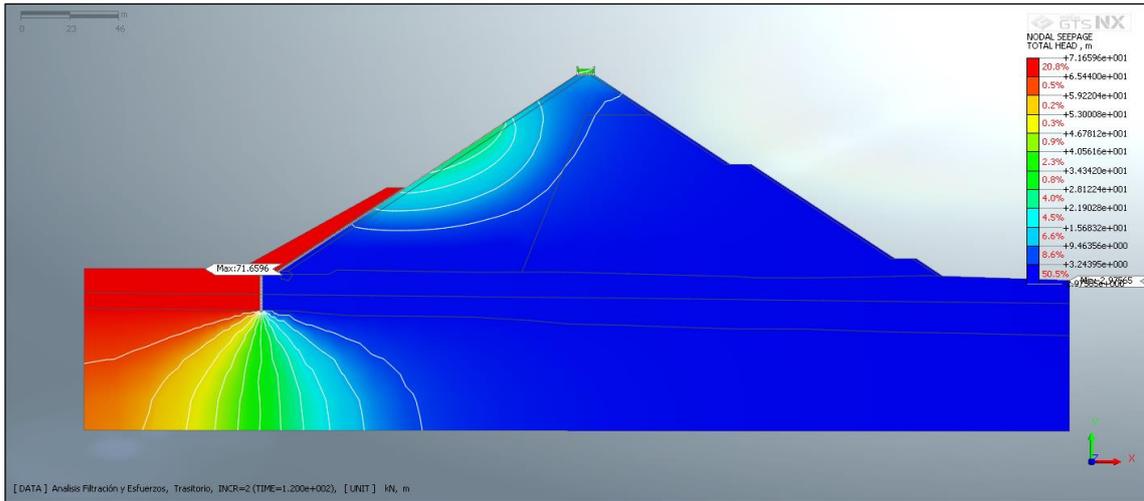
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png**



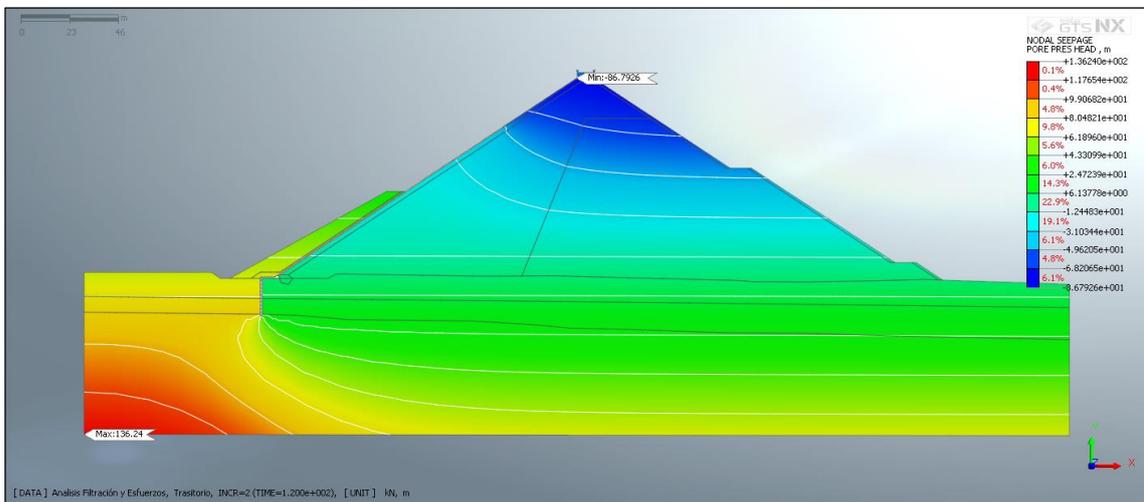
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png**



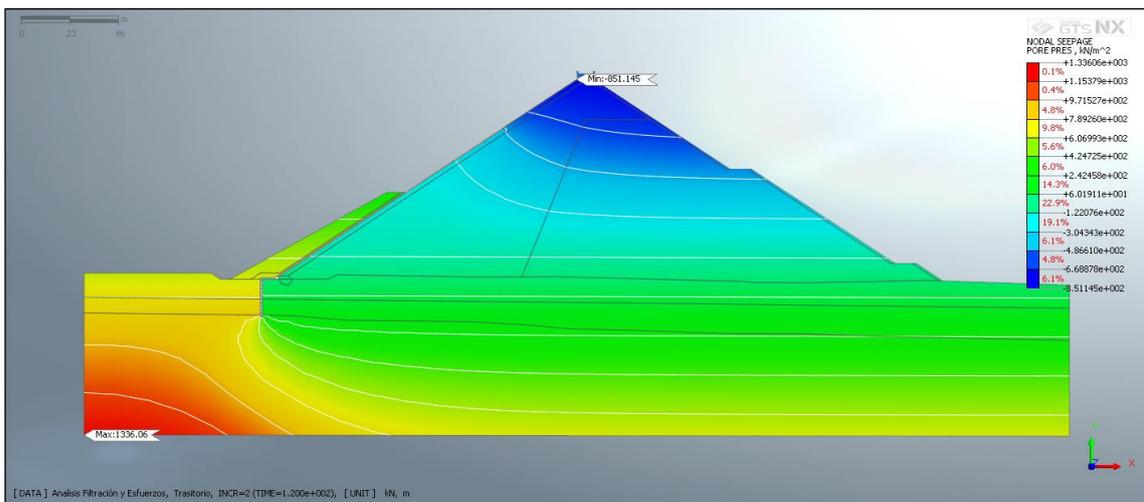
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=1 (TIME=6.000e+001)_Plane Strain
Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png**



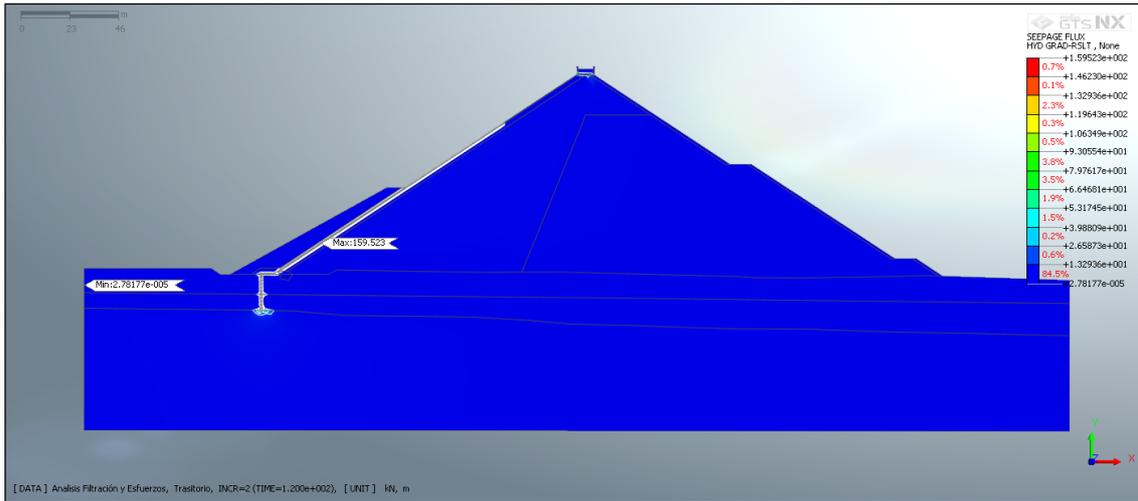
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



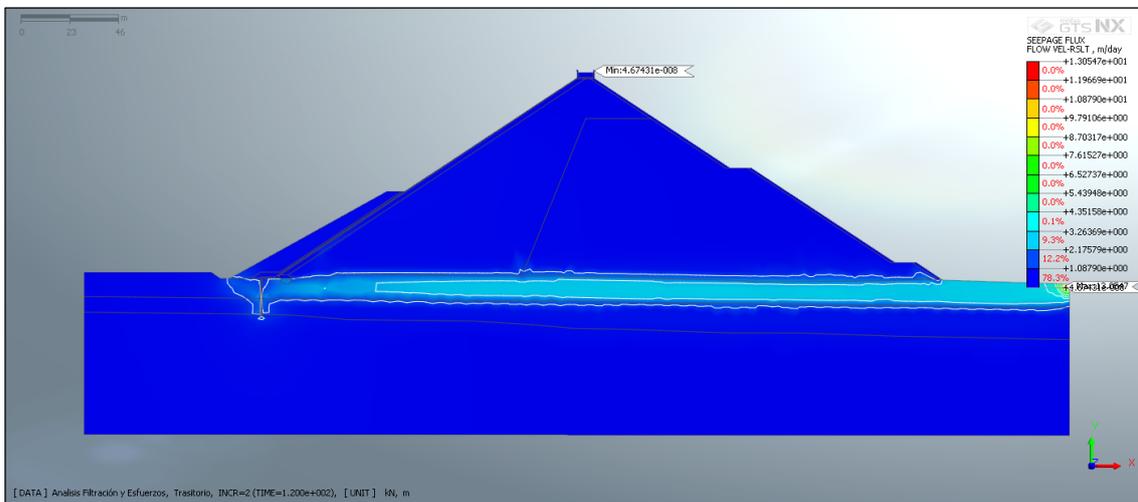
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



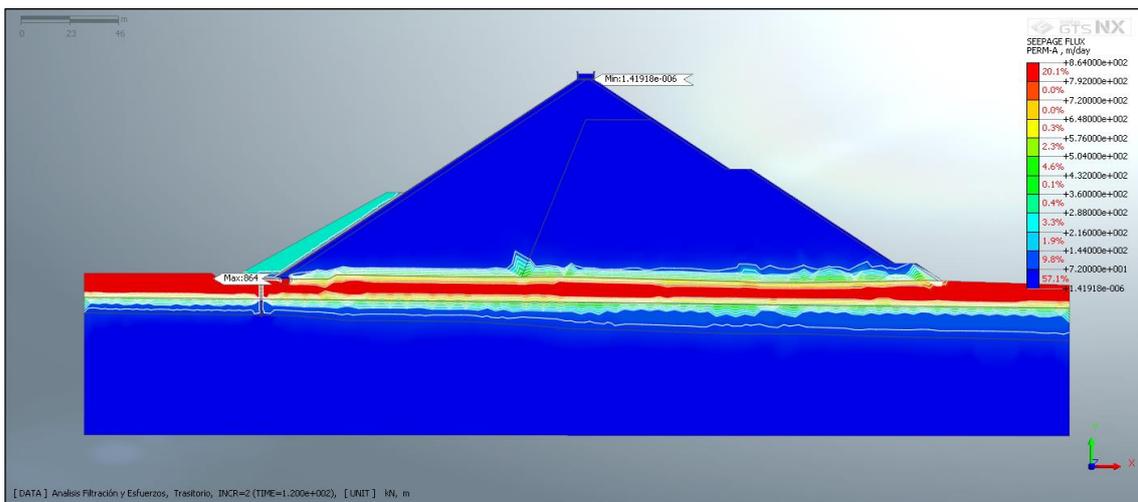
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



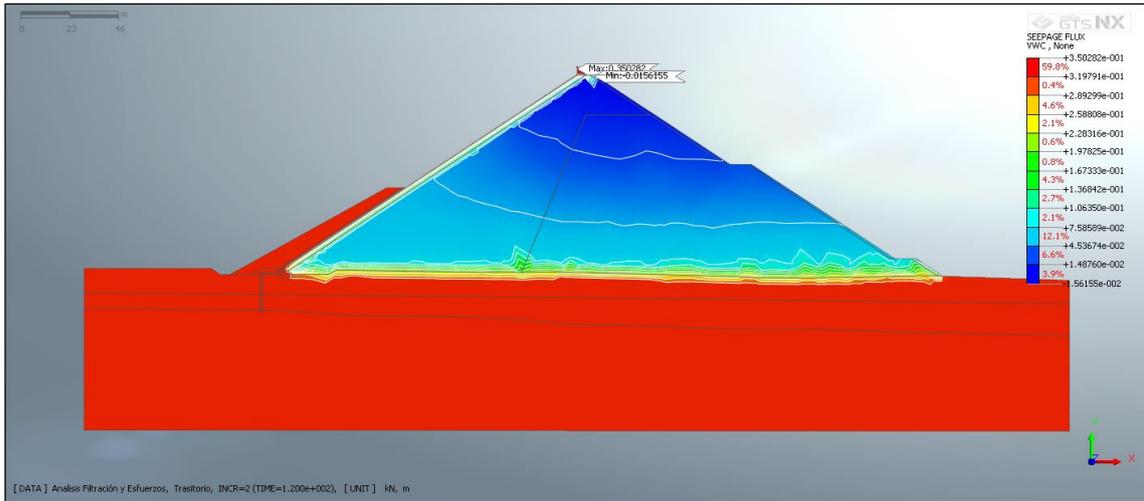
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



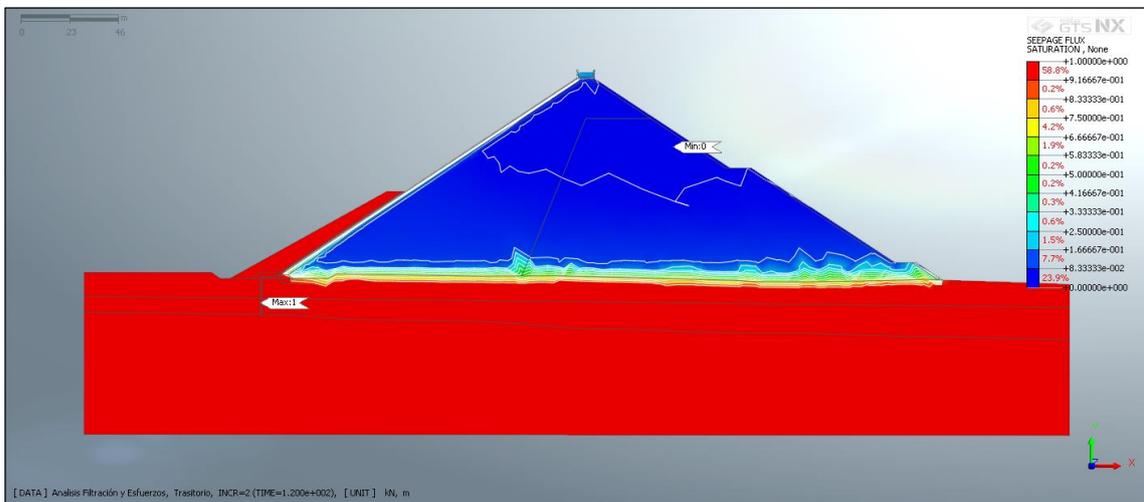
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



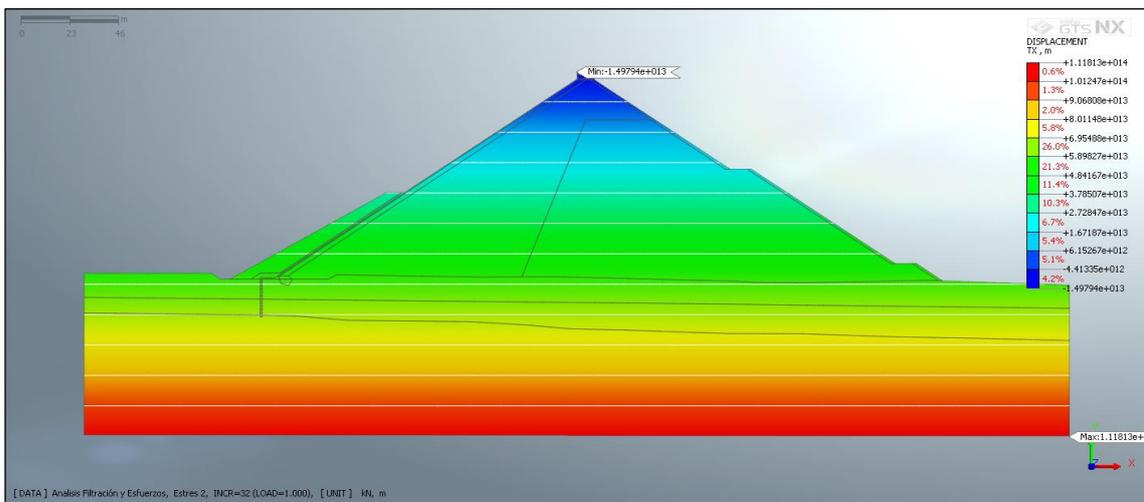
Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png



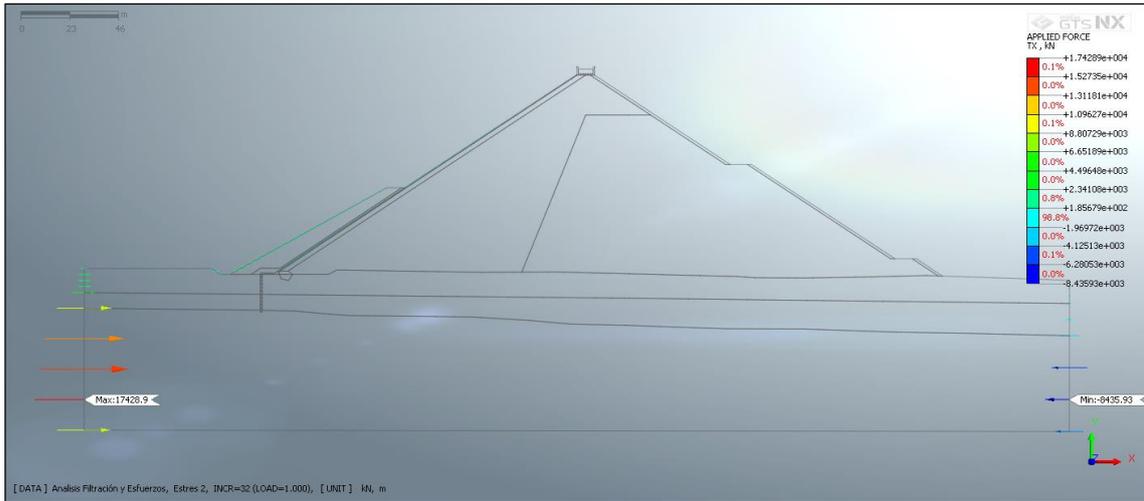
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png**



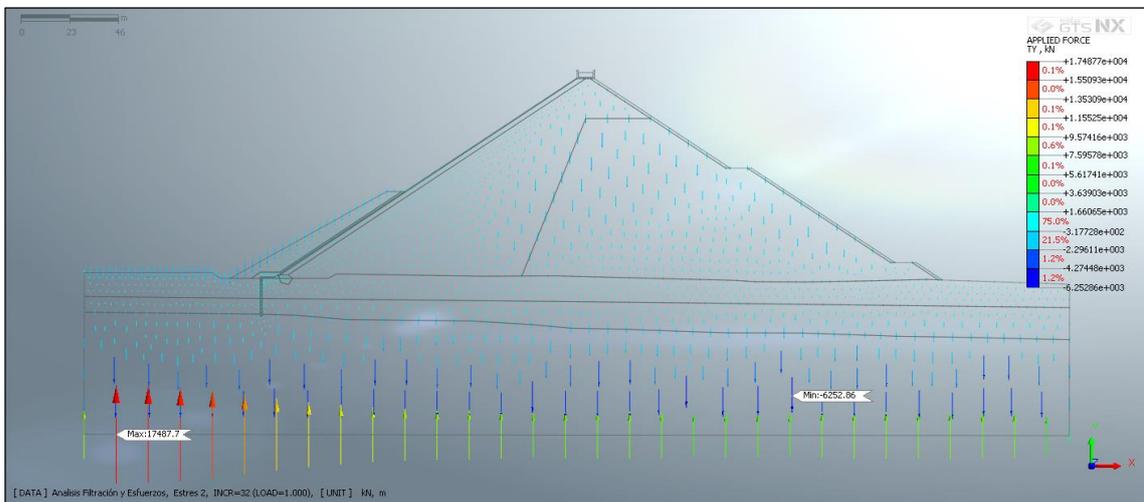
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Trasitorio_INCR=2 (TIME=1.200e+002)_Plane Strain
Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png**



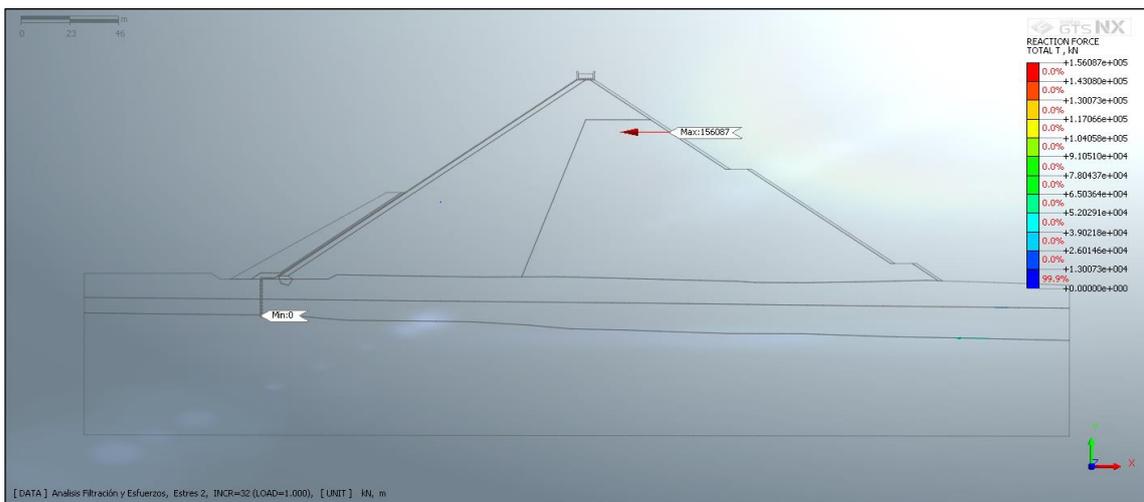
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2_INCR=32
(LOAD=1.000)_Displacements_TX TRANSLATION (V)_Current.png**



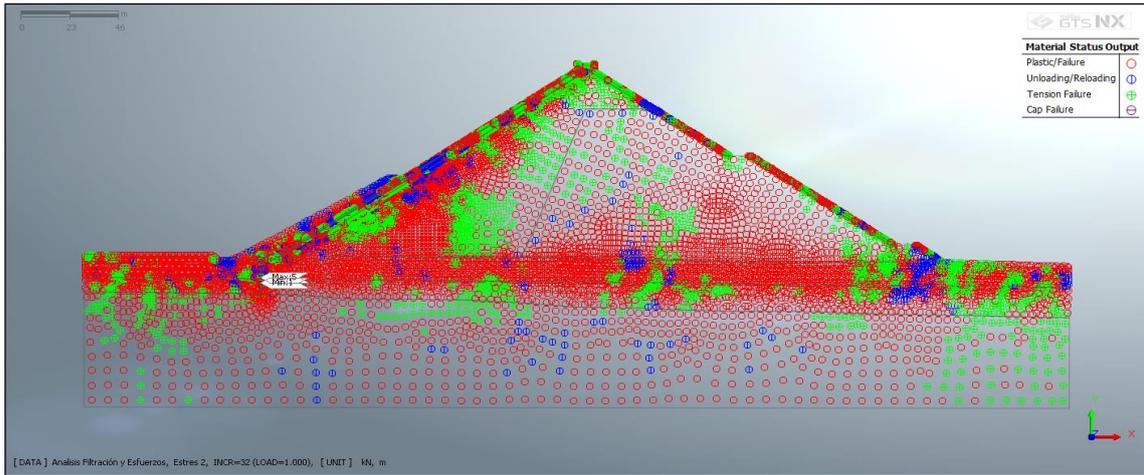
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TX
APPLIED FORCE_Current.png**



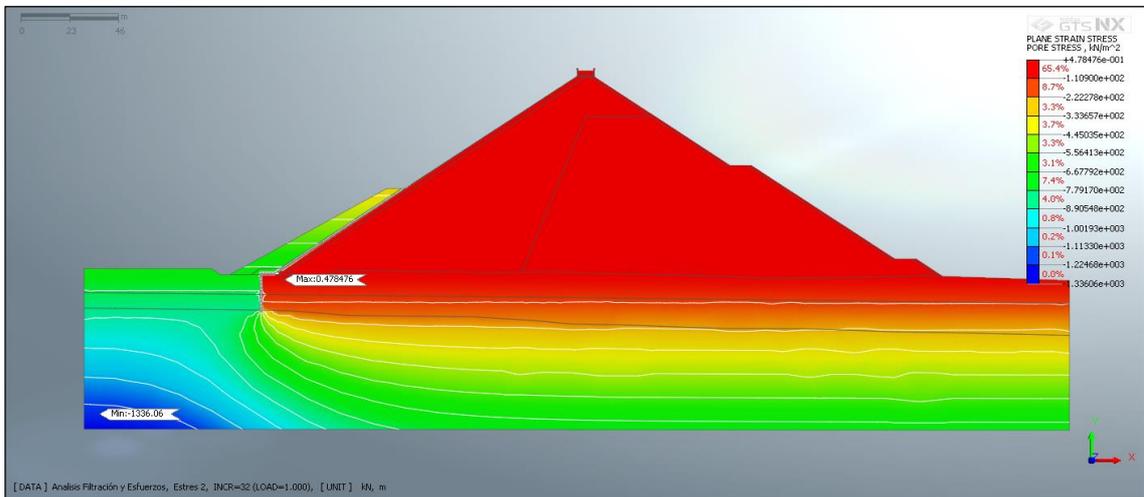
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TY
APPLIED FORCE_Current.png**



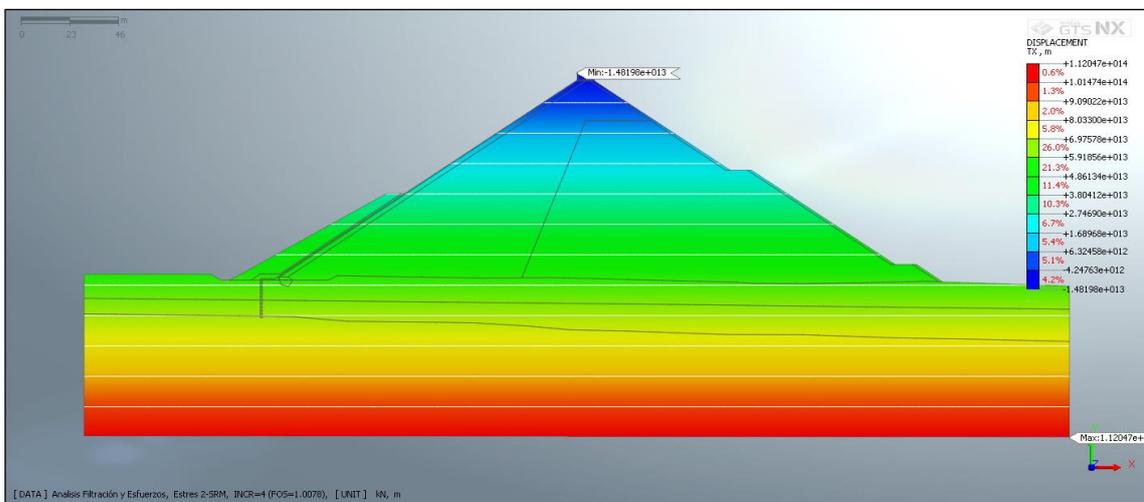
**Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2_INCR=32 (LOAD=1.000)_Reactions_TOTAL
REACTION FORCE_Current.png**



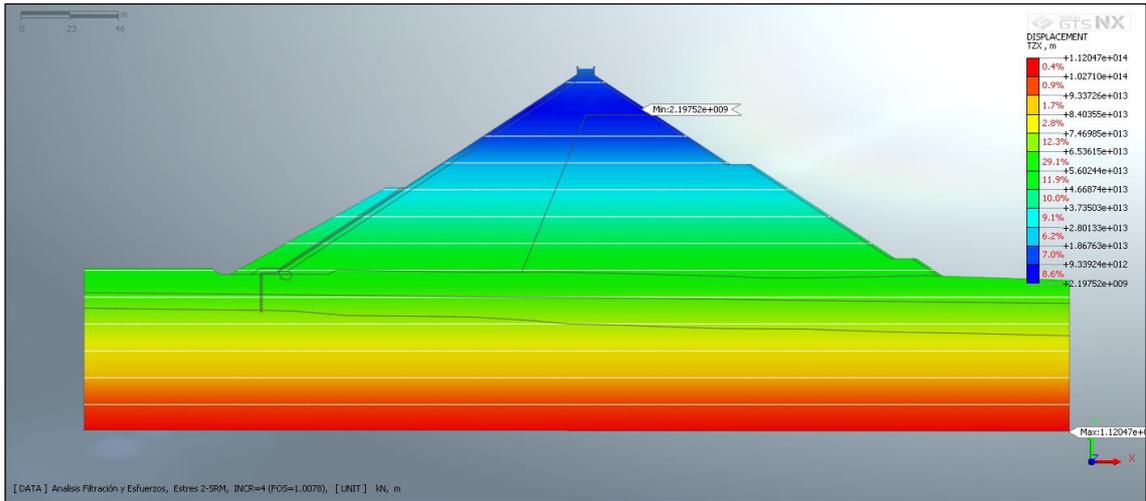
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2_INCR=32 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_PLASTIC STATUS_Current.png



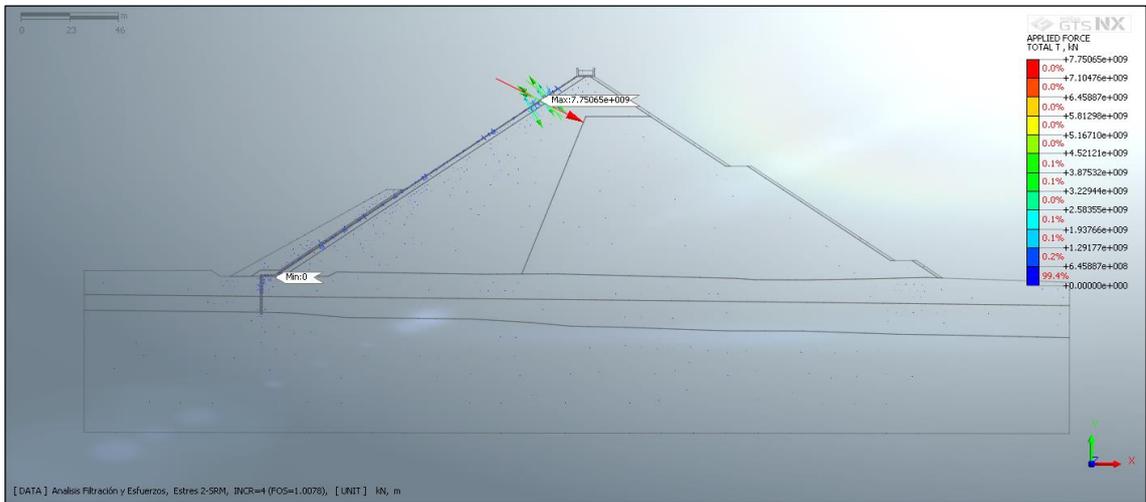
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2_INCR=32 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_PORE STRESS_Current.png



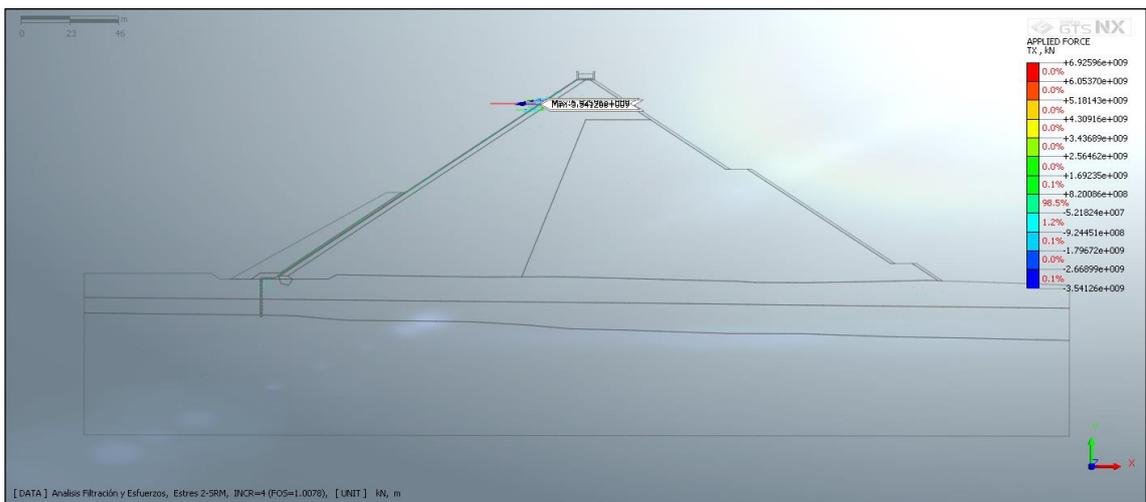
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2-SRM_INCR=4 (FOS=1.0078)_Displacements_TX TRANSLATION (V)_Current.png



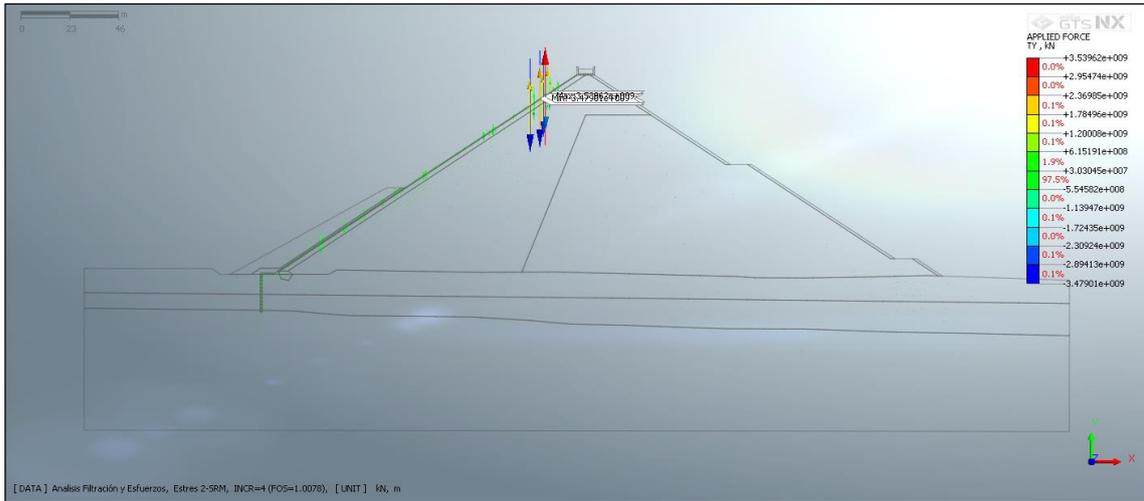
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2-SRM_INCR=4 (FOS=1.078)_Displacements_TZX TRANSLATION (V)_Current.png



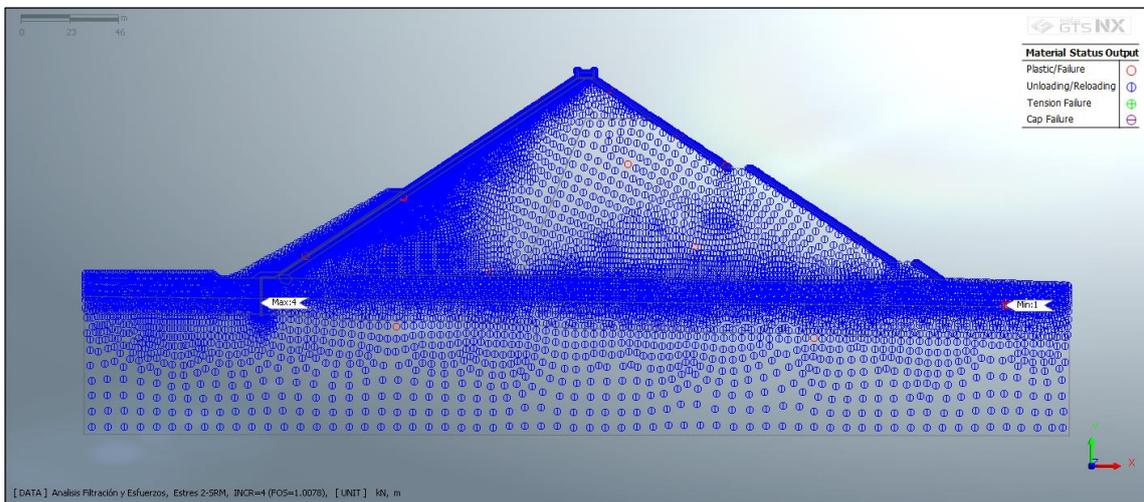
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2-SRM_INCR=4 (FOS=1.078)_Grid Forces_TOTAL APPLIED FORCE_Current.png



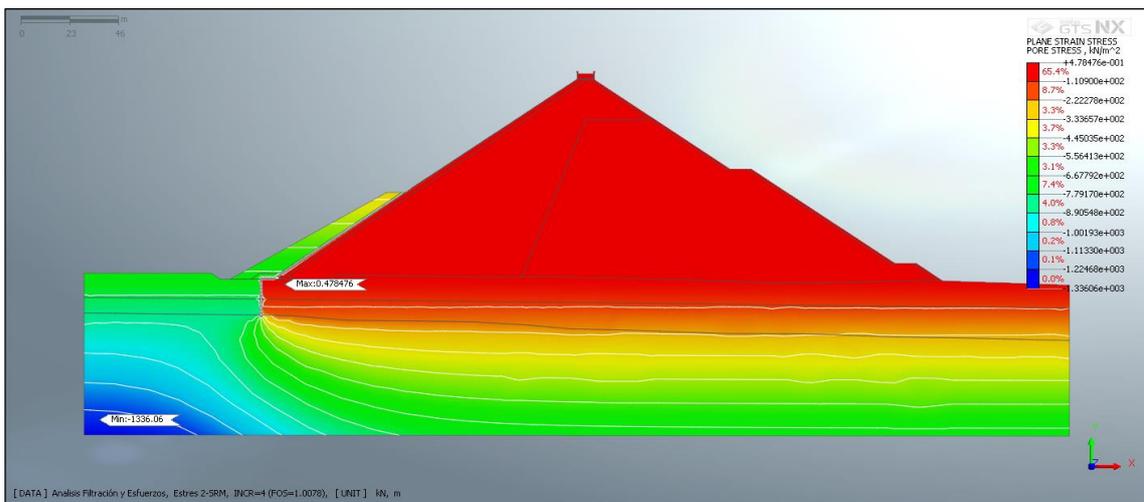
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2-SRM_INCR=4 (FOS=1.0078)_Grid Forces_TX APPLIED FORCE_Current.png



Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2-SRM_INCR=4 (FOS=1.078)_Grid Forces_TY APPLIED FORCE_Current.png

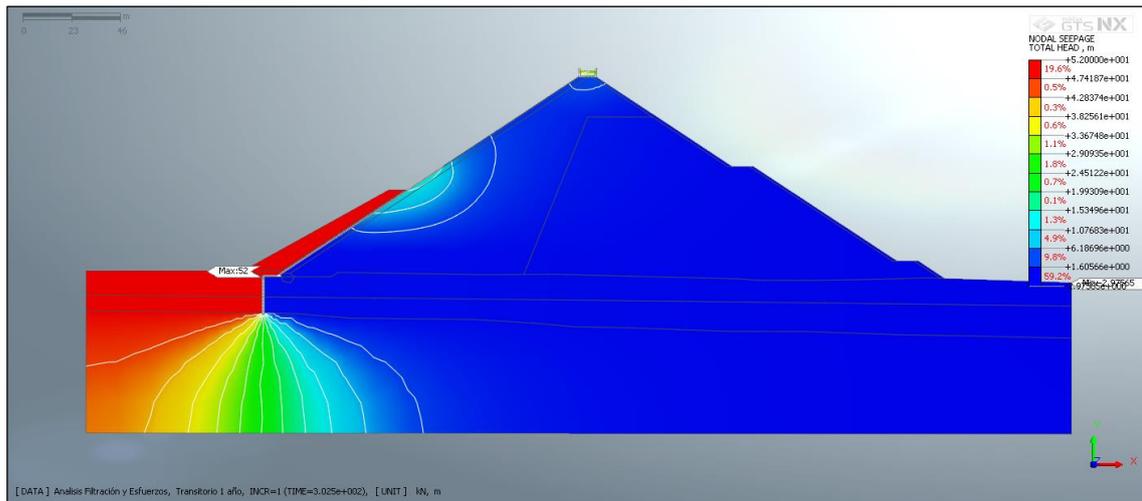


Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2-SRM_INCR=4 (FOS=1.078)_Plane Strain Stresses_PLASTIC STATUS_Current.png

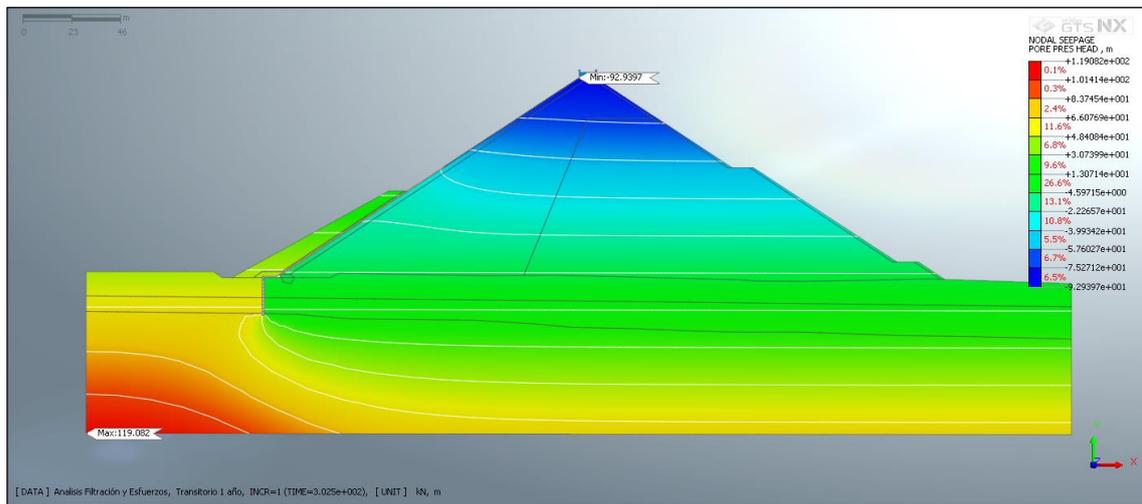


Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 2-SRM_INCR=4 (FOS=1.0078)_Plane Strain Stresses_PORE STRESS_Current.png

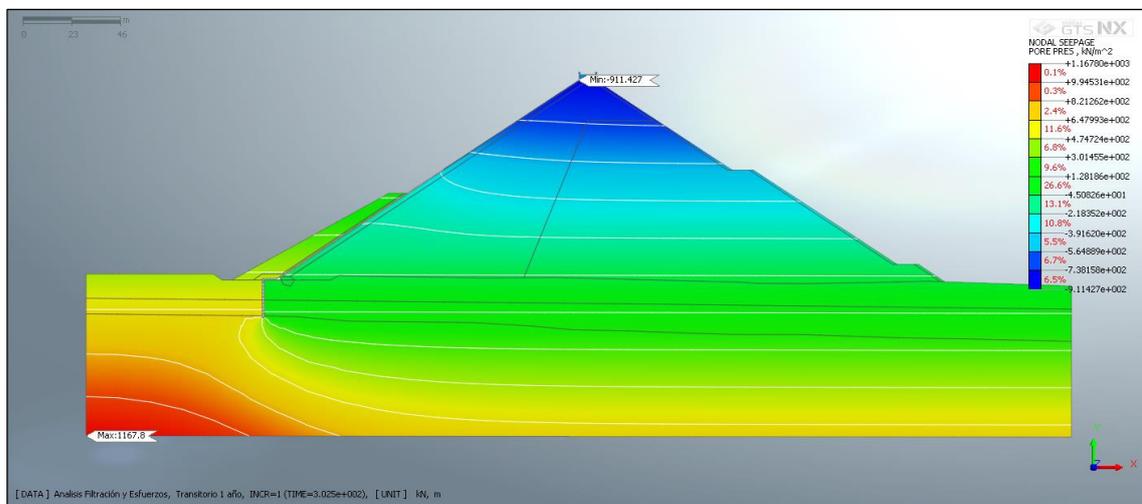
Escenario Transitorio - Estabilidad



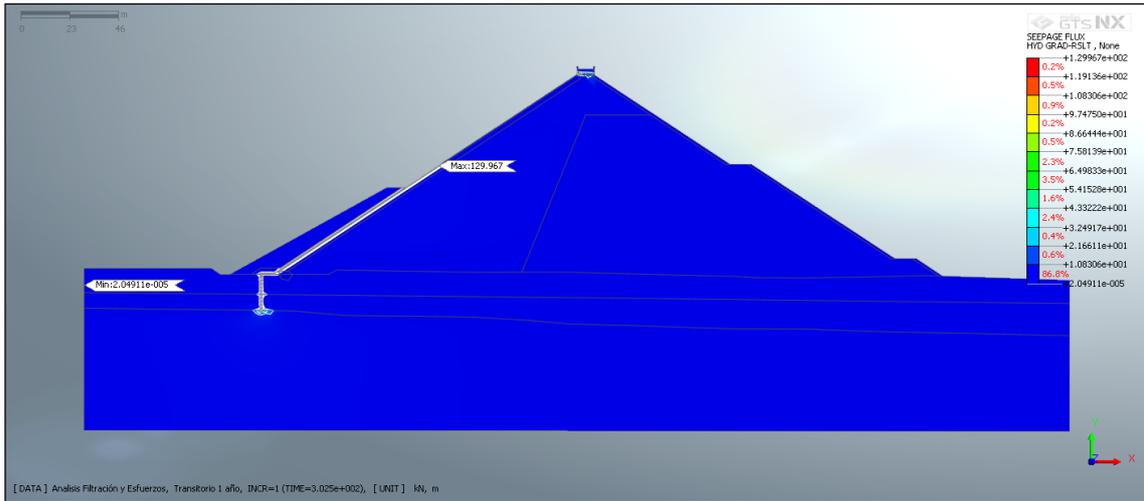
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



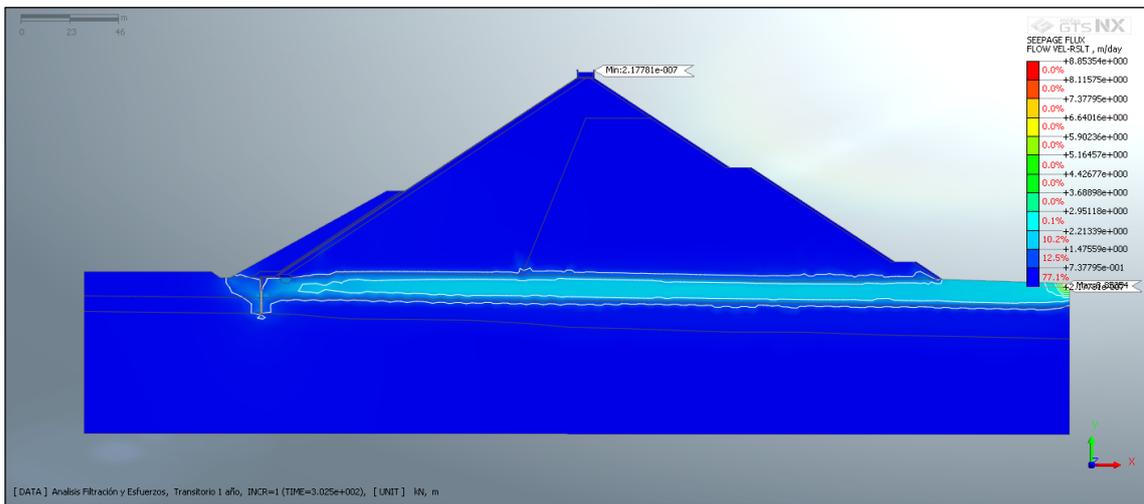
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



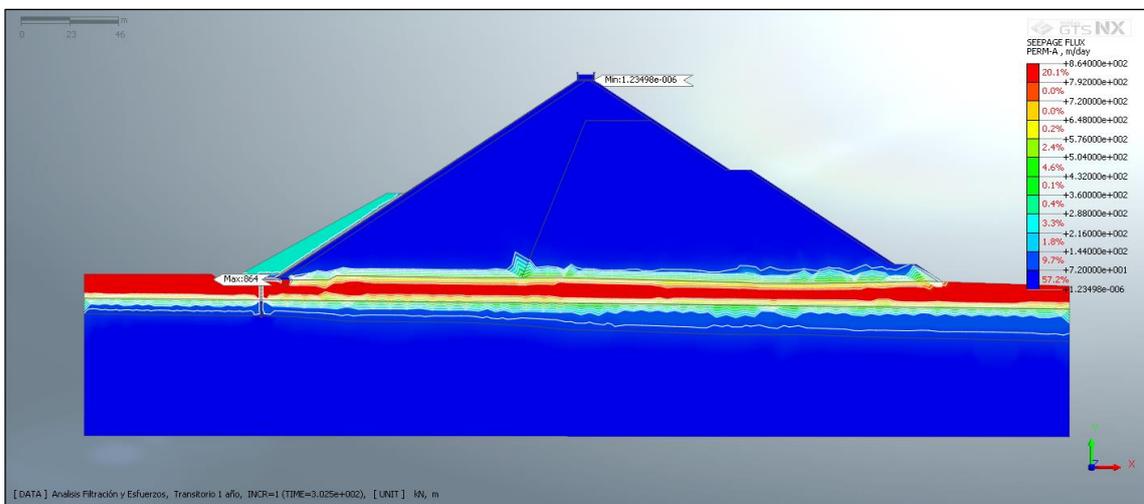
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



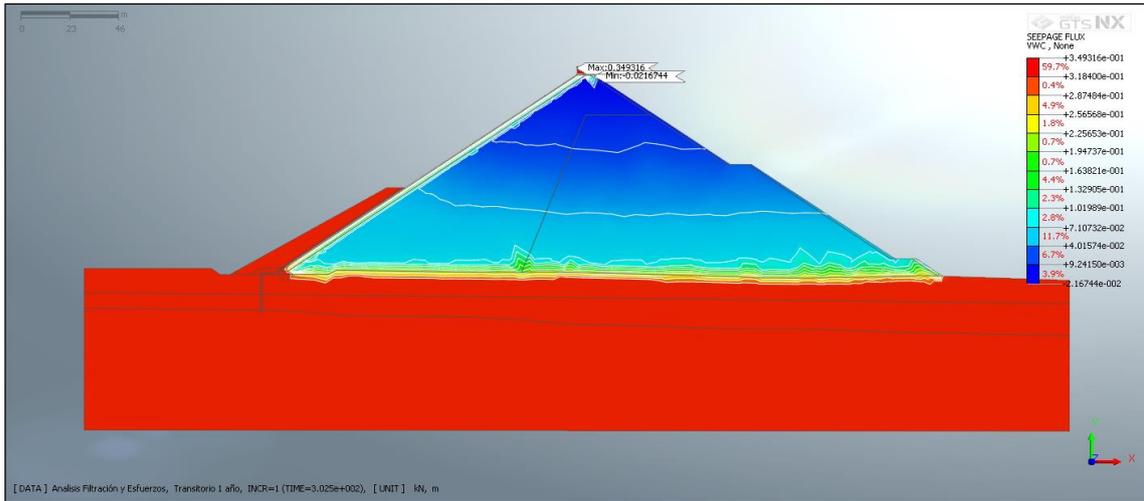
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



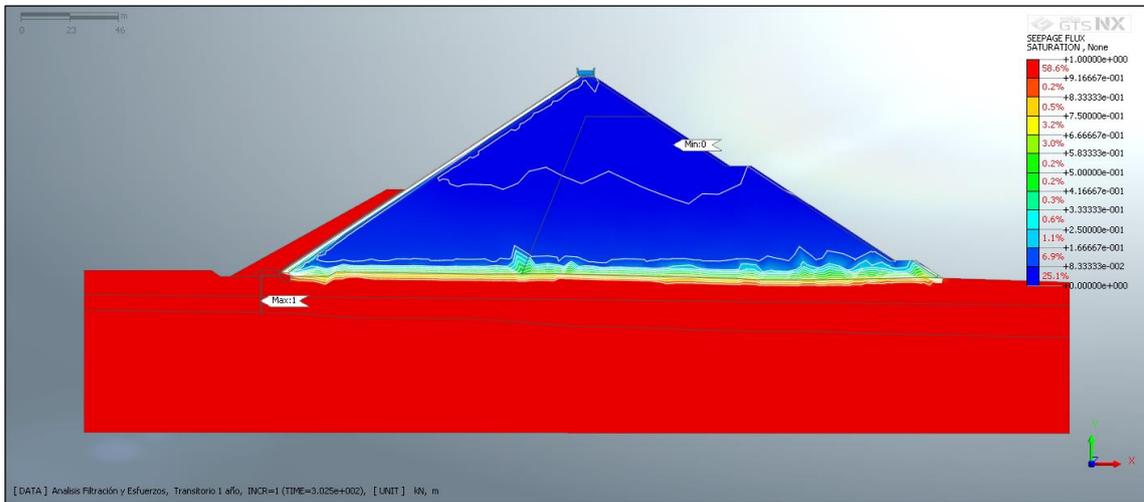
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



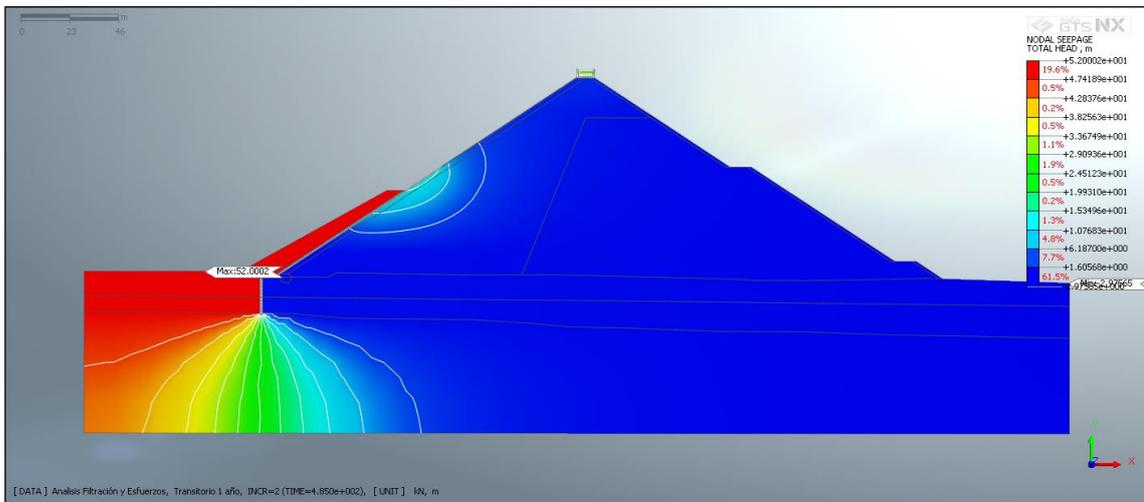
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png



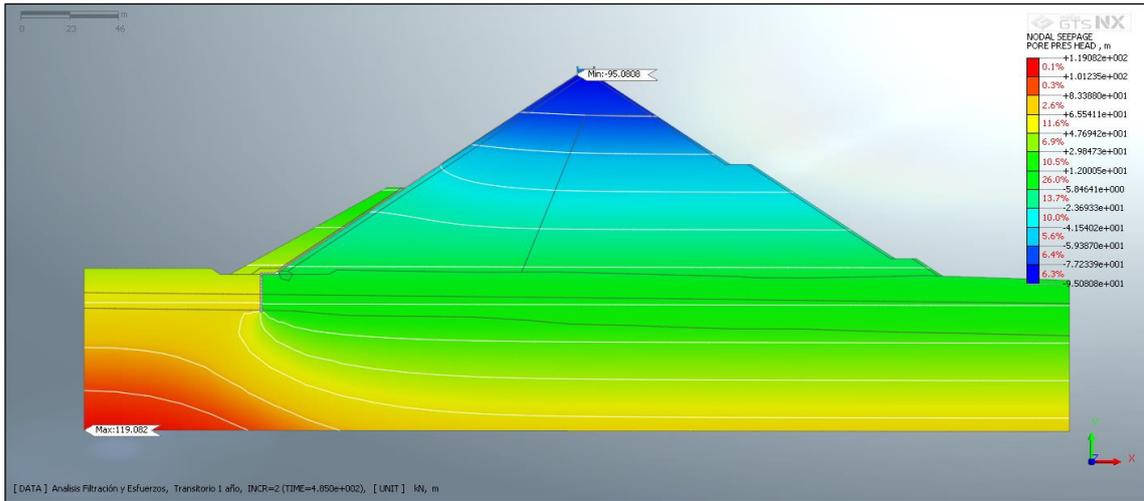
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png



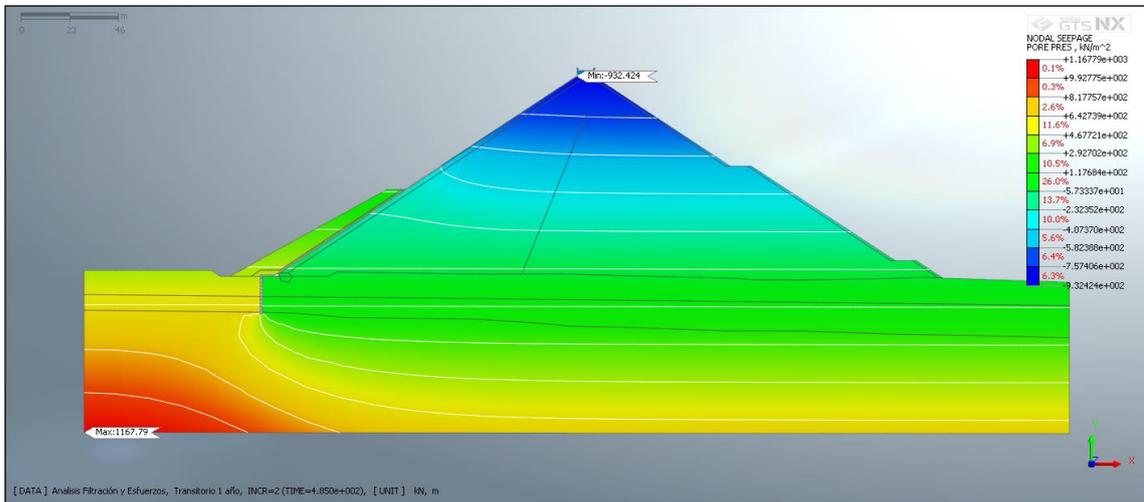
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=1 (TIME=3.025e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png



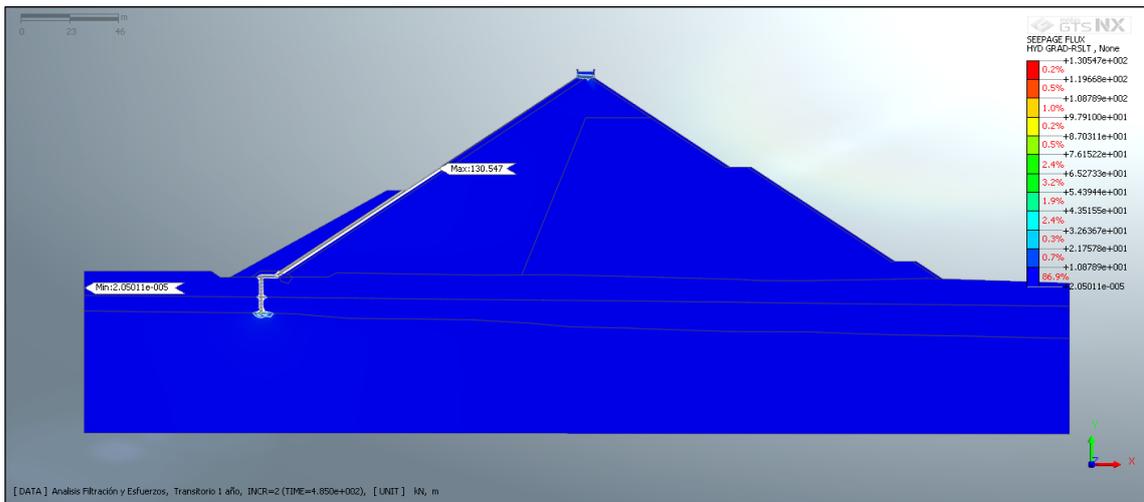
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Nodal Seepage Results_TOTAL HEAD_Current.png



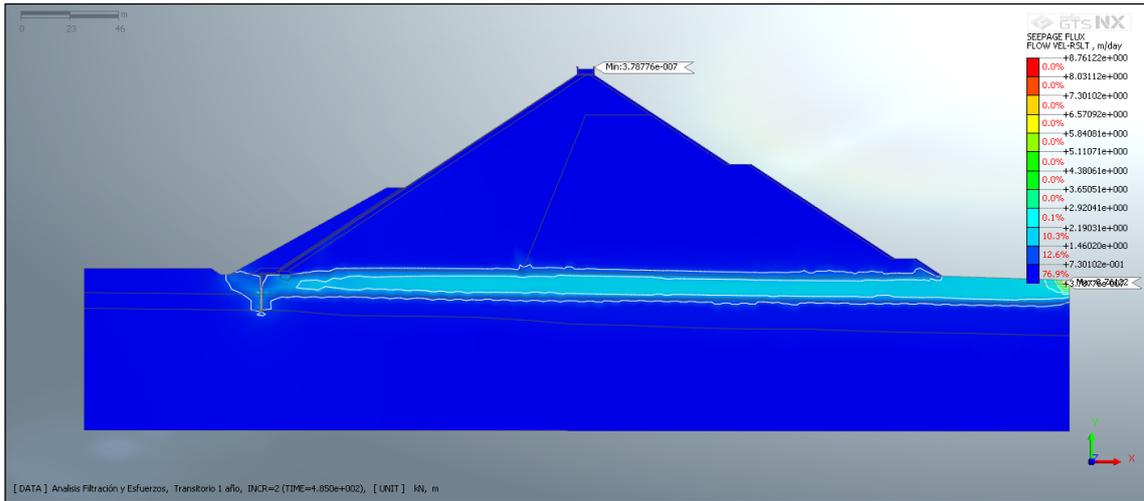
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE HEAD_Current.png



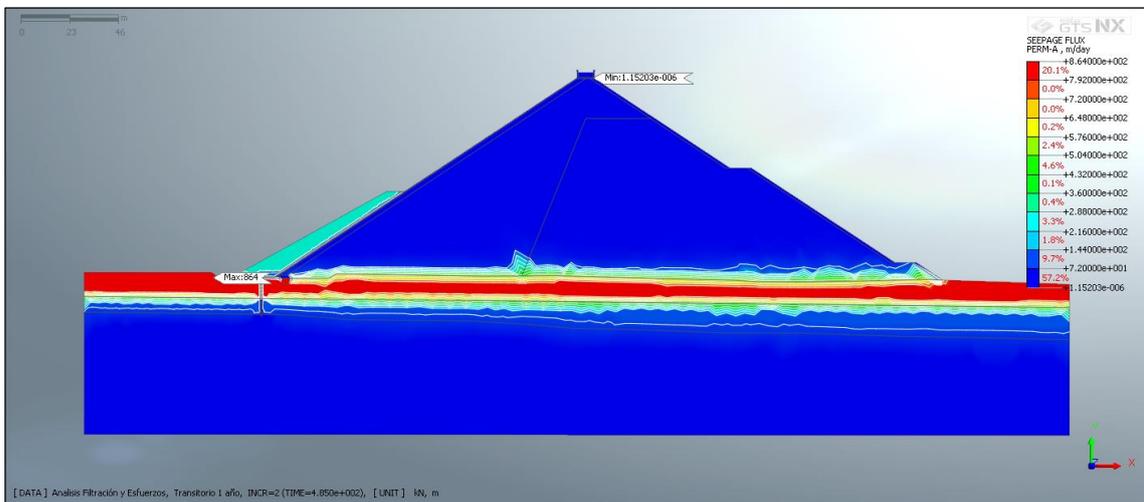
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Nodal Seepage Results_PORE PRESSURE_Current.png



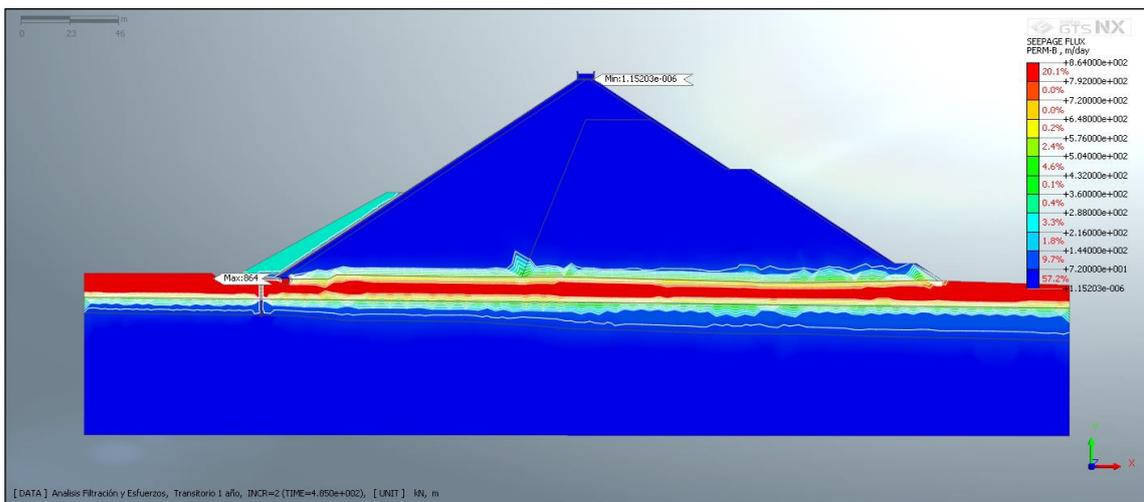
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_HYDRAULIC GRADIENT RESULTANT (V)_Current.png



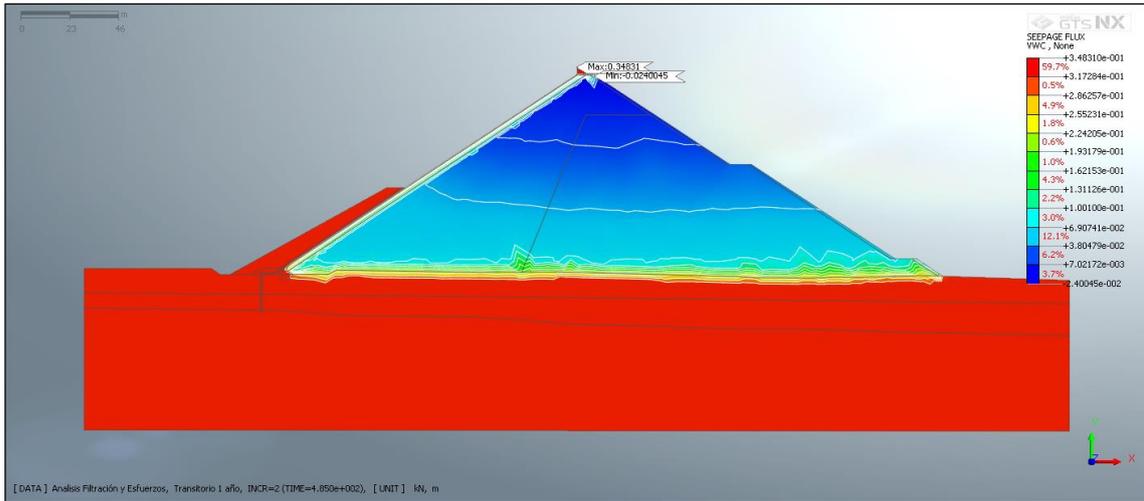
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_SEEPAGE FLOW VELOCITY RESULTANT (V)_Current.png



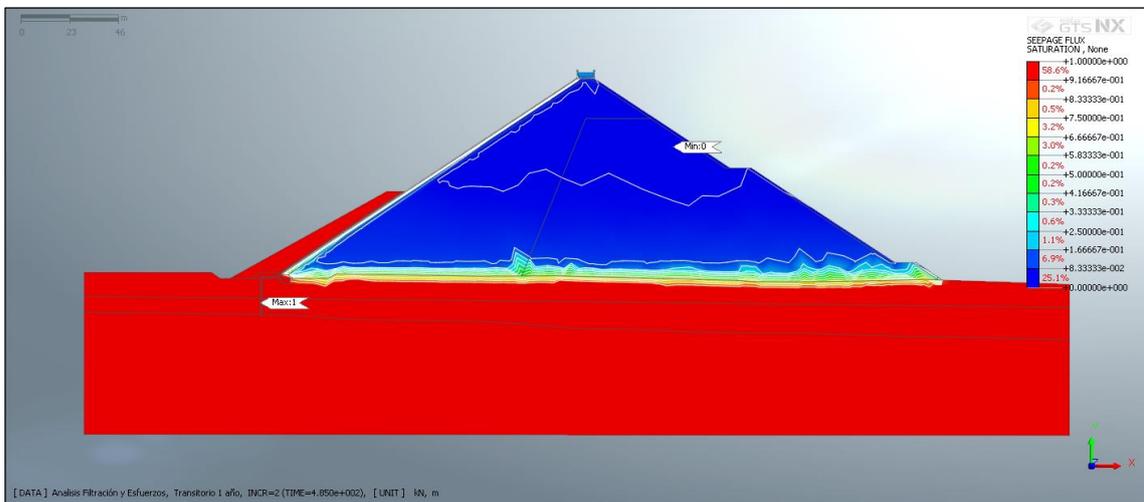
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY A (V)_Current.png



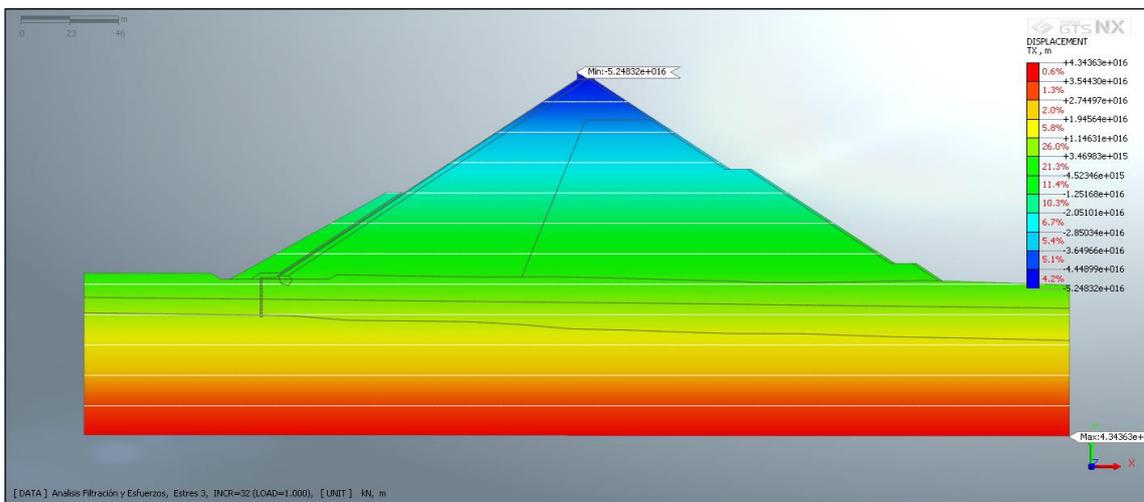
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_PERMEABILITY B (V)_Current.png



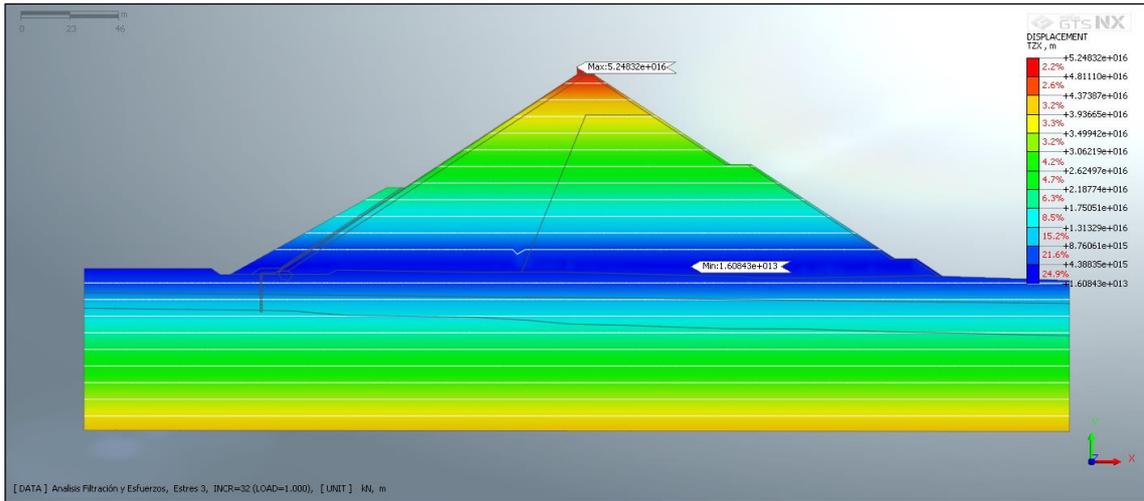
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_VOLUMETRIC WATER CONTENT_Current.png



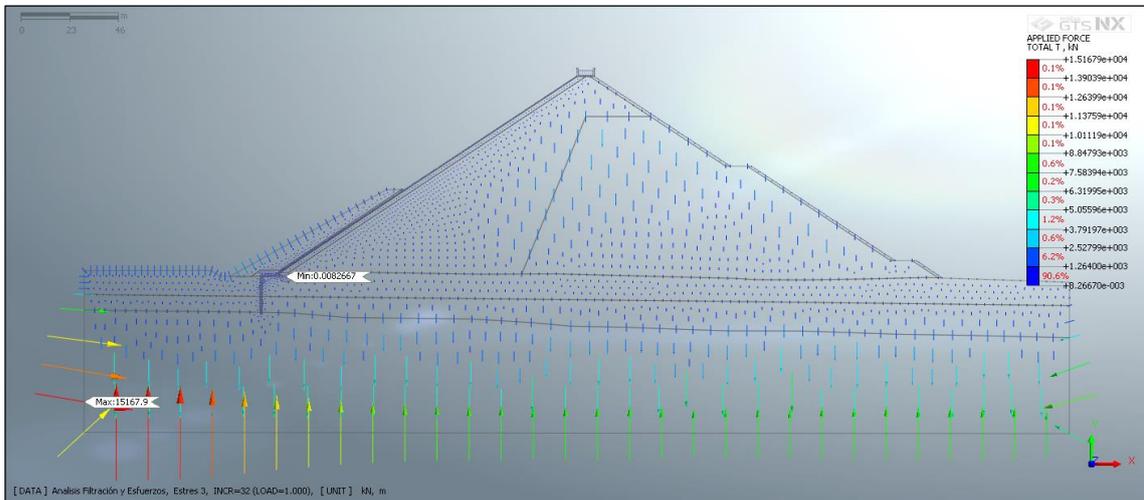
Analisis Filtración y Esfuerzos_Transitorio 1 año_INCR=2 (TIME=4.850e+002)_Plane Strain Seepage Fluxes_DEGREE OF SATURATION_Current.png



Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Displacements_TX TRANSLATION (V)_Current.png



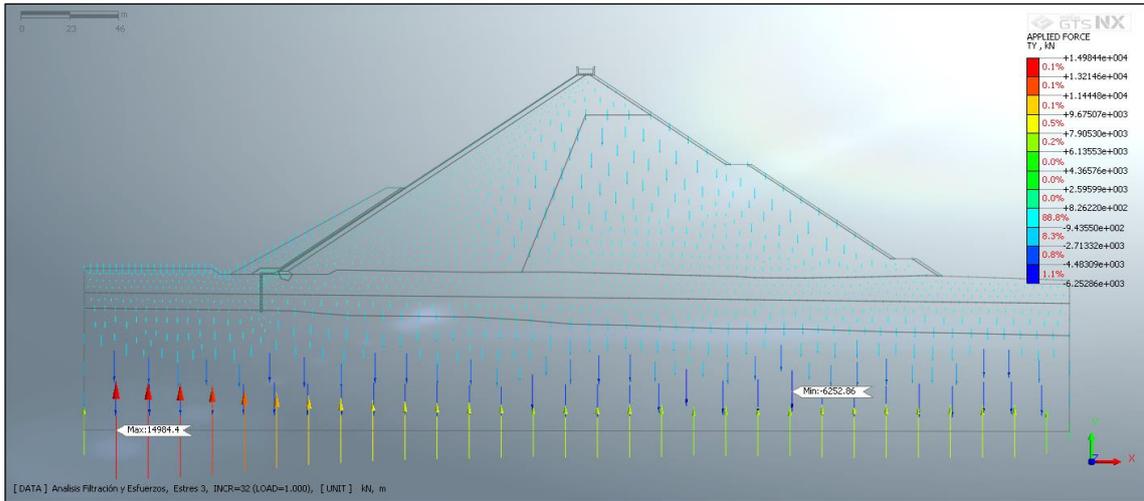
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Displacements_TZX TRANSLATION (V)_Current.png



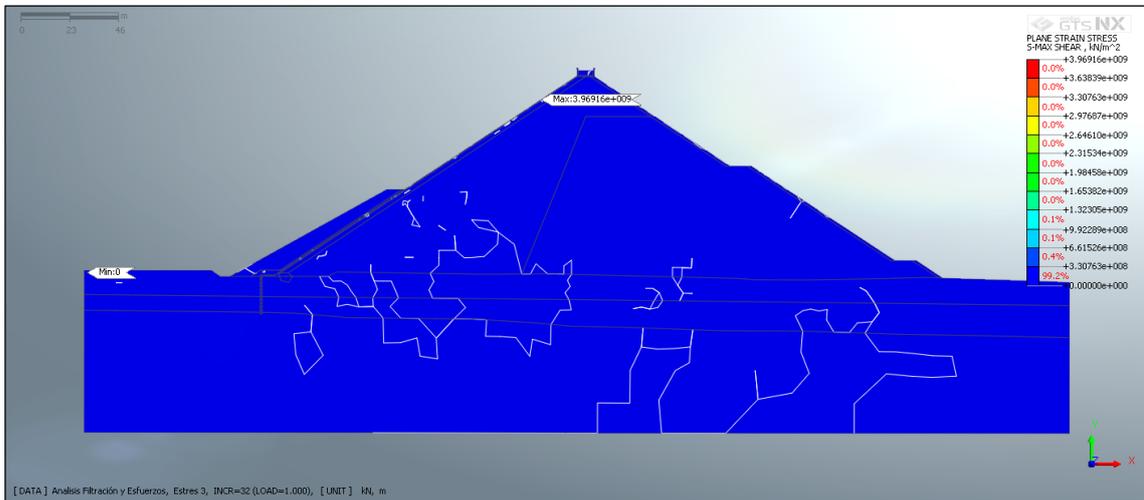
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TOTAL APPLIED FORCE_Current.png



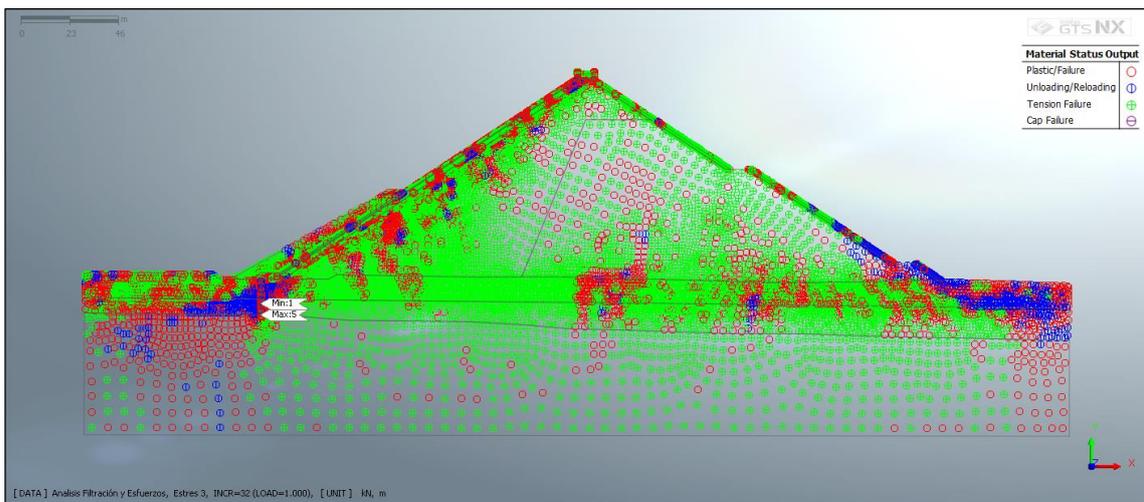
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TX APPLIED FORCE_Current.png



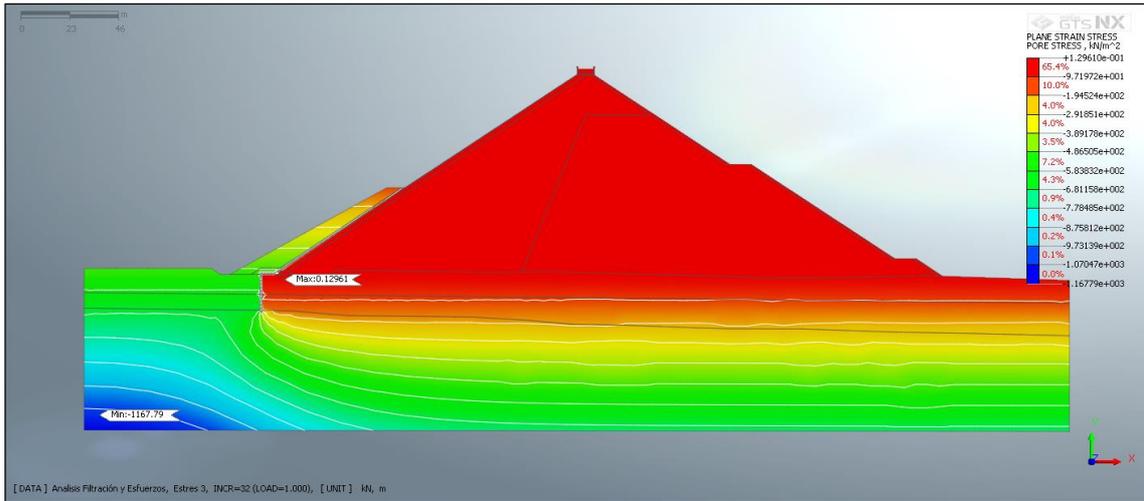
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TY APPLIED FORCE_Current.png



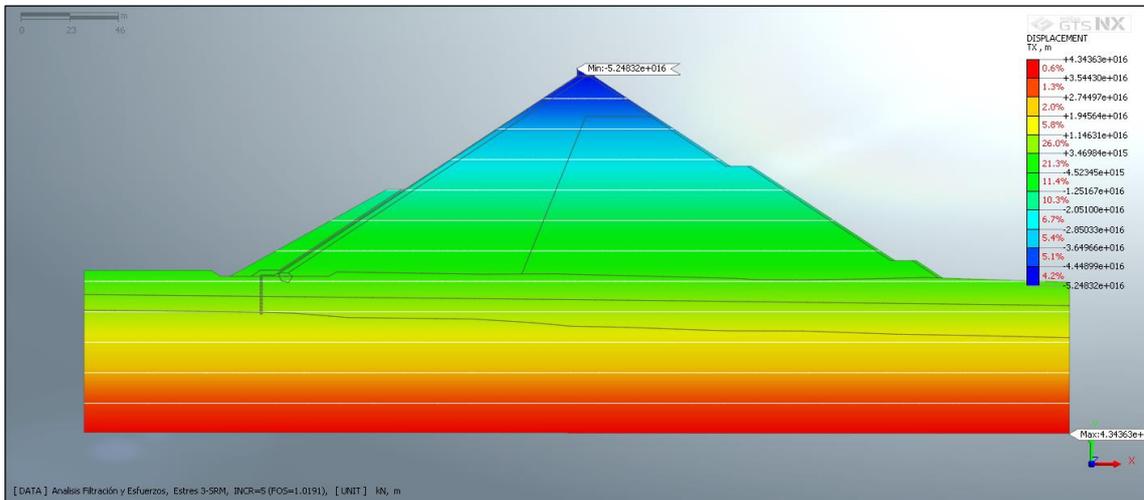
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_S-MAX SHEAR_Current.png



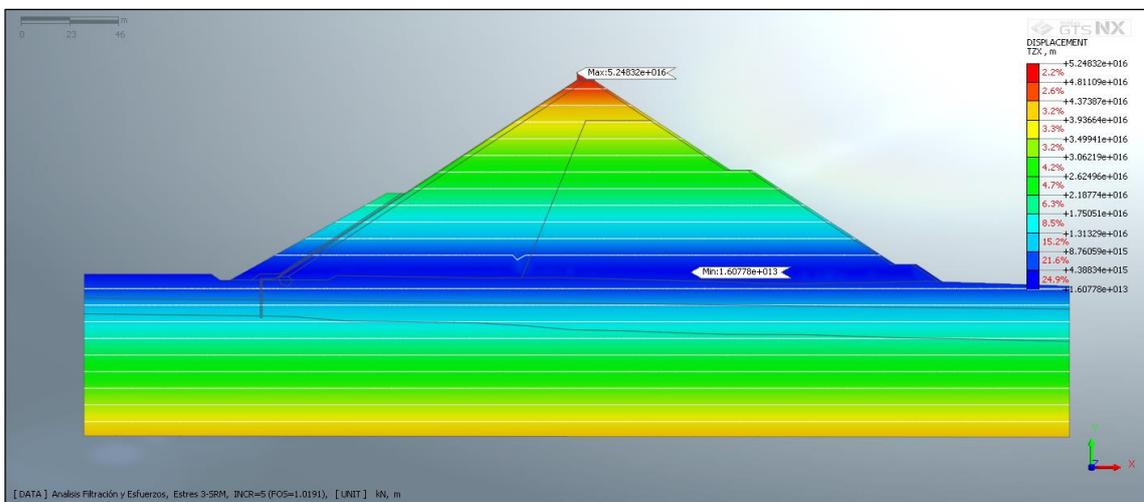
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_PLASTIC STATUS_Current.png



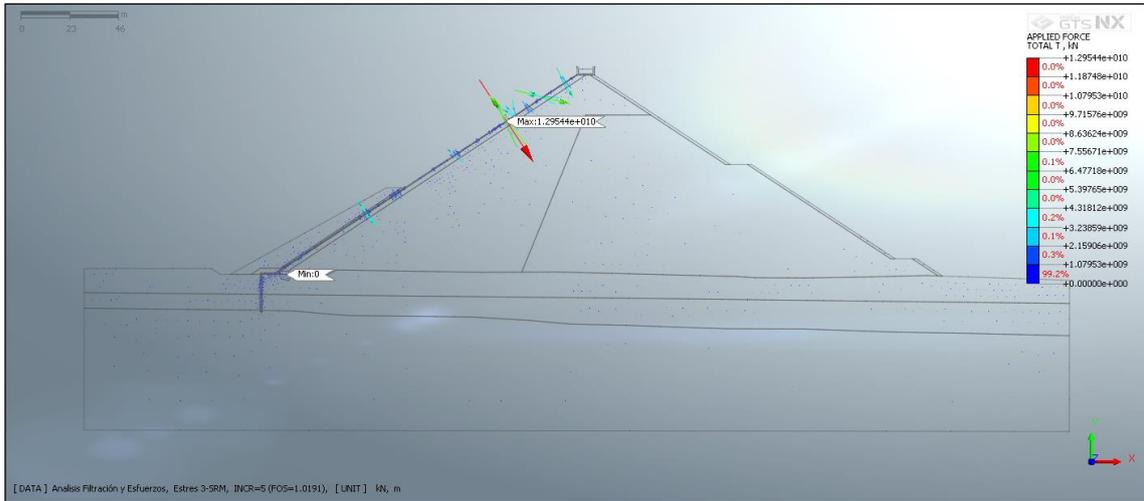
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3_INCR=32 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_PORE STRESS_Current.png



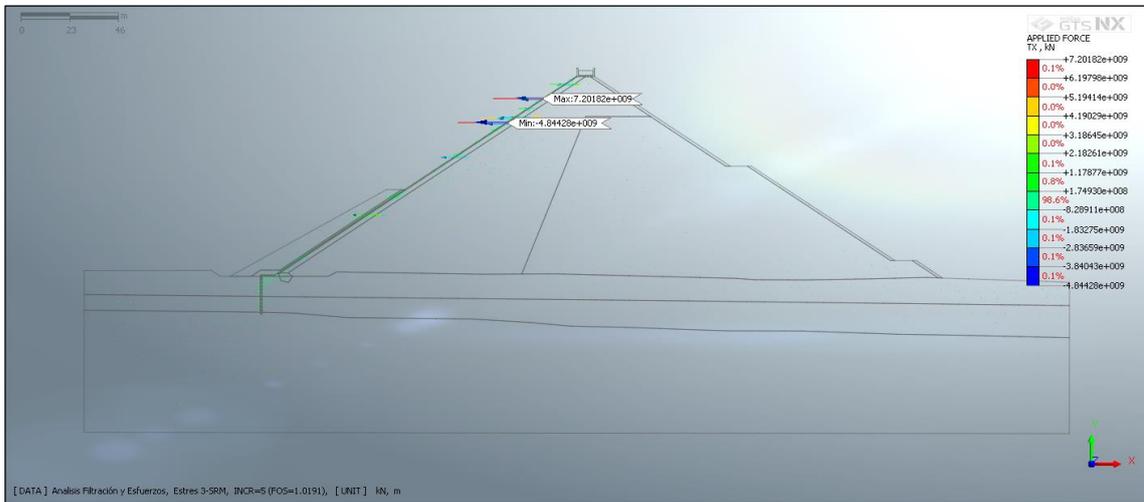
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3-SRM_INCR=5 (FOS=1.0191)_Displacements_TX TRANSLATION (V)_Current.png



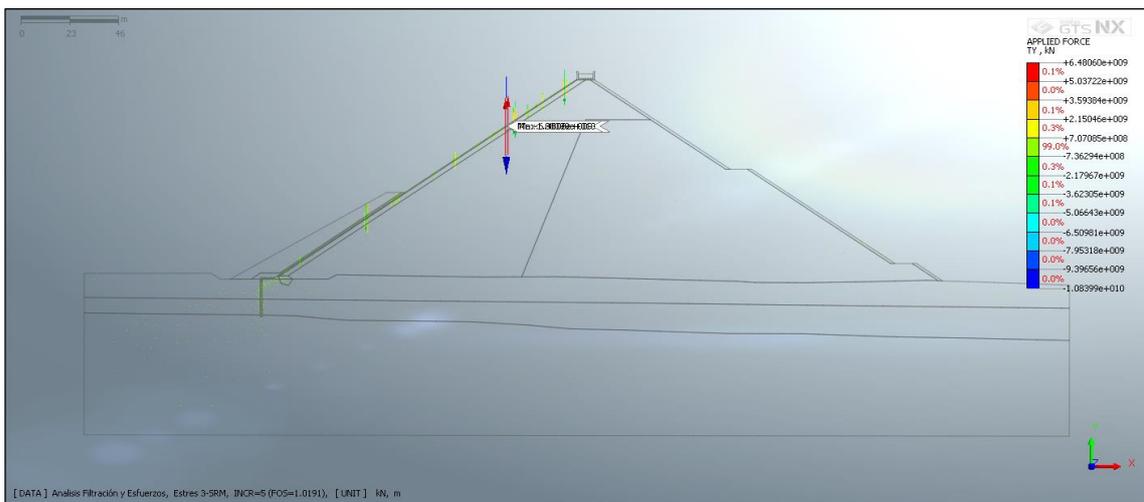
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3-SRM_INCR=5 (FOS=1.0191)_Displacements_TZX TRANSLATION (V)_Current.png



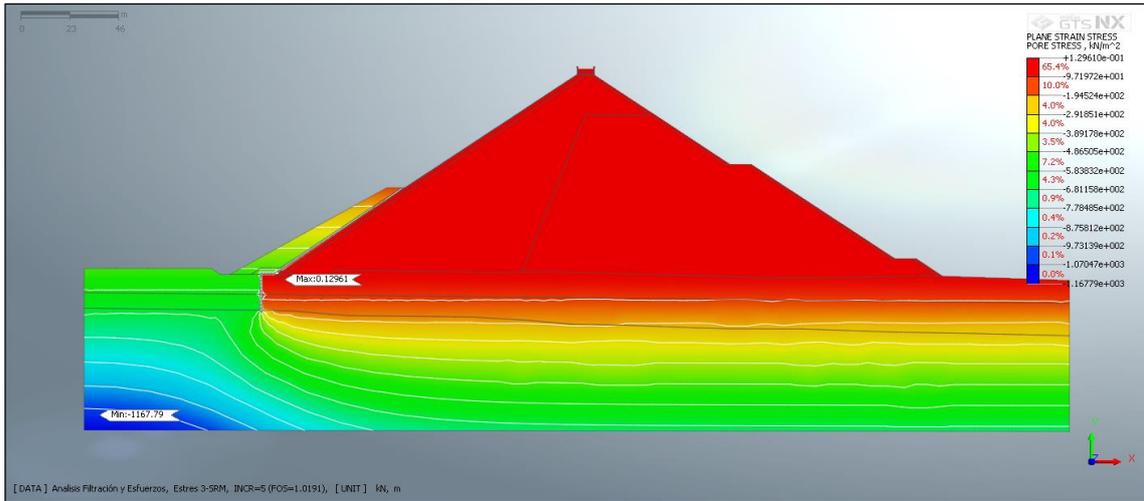
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3-SRM_INCR=5 (FOS=1.191)_Grid Forces_TOTAL APPLIED FORCE_Current.png



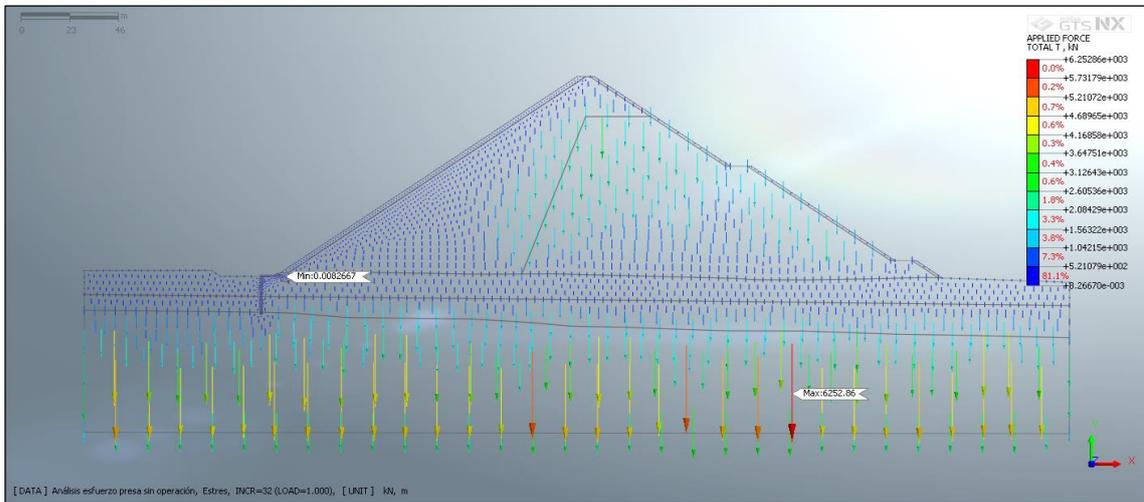
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3-SRM_INCR=5 (FOS=1.191)_Grid Forces_TX APPLIED FORCE_Current.png



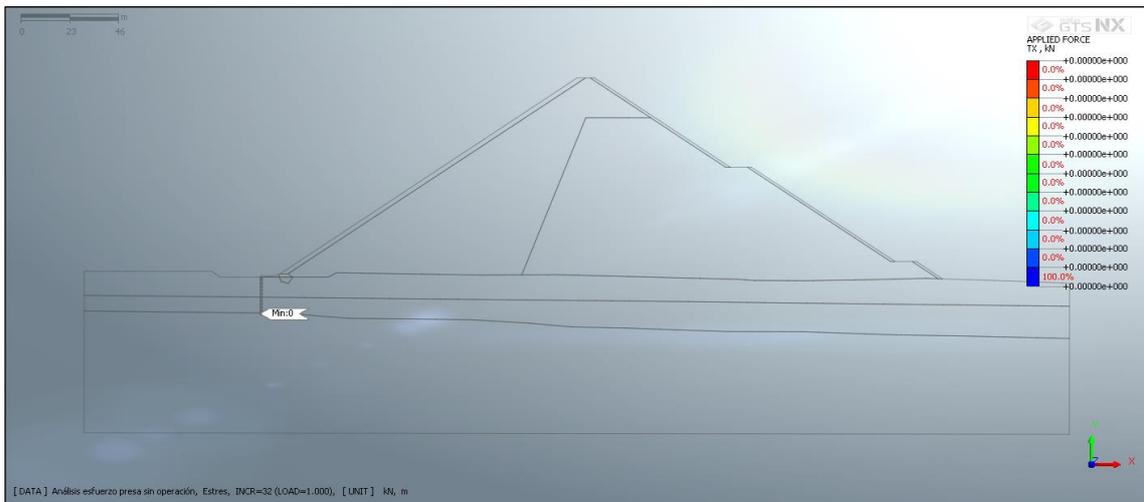
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3-SRM_INCR=5 (FOS=1.0191)_Grid Forces_TY APPLIED FORCE_Current.png



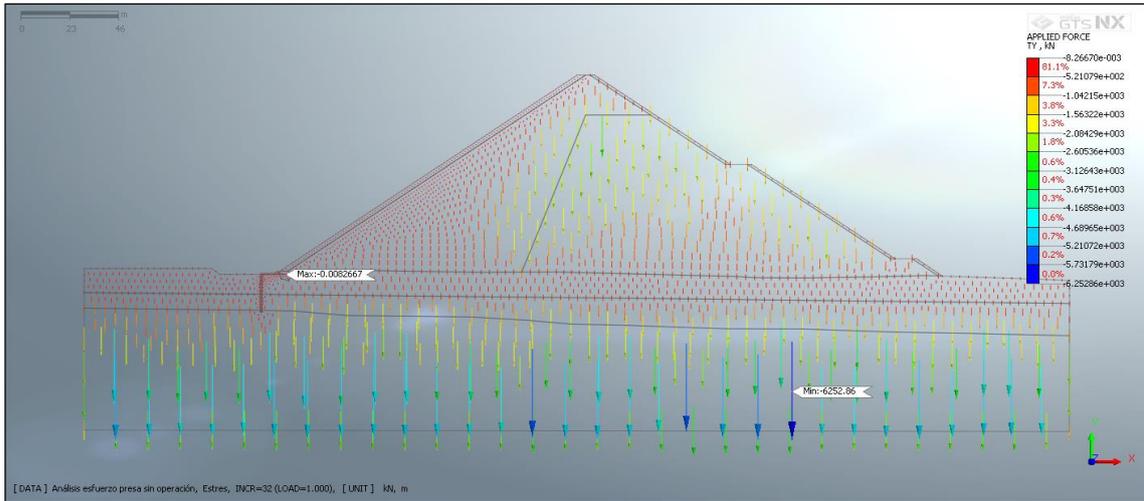
Analisis Filtración y Esfuerzos_Estres 3-SRM_INCR=5 (FOS=1.0191)_Plane Strain Stresses_PORE STRESS_Current.png



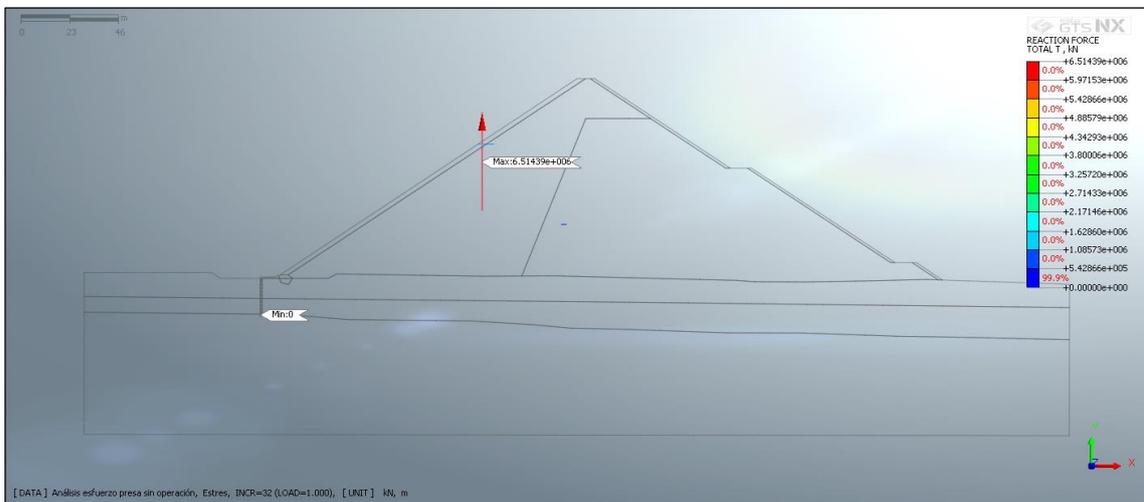
Analisis esfuerzo presa sin operación_Estres_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TOTAL APPLIED FORCE_Current.png



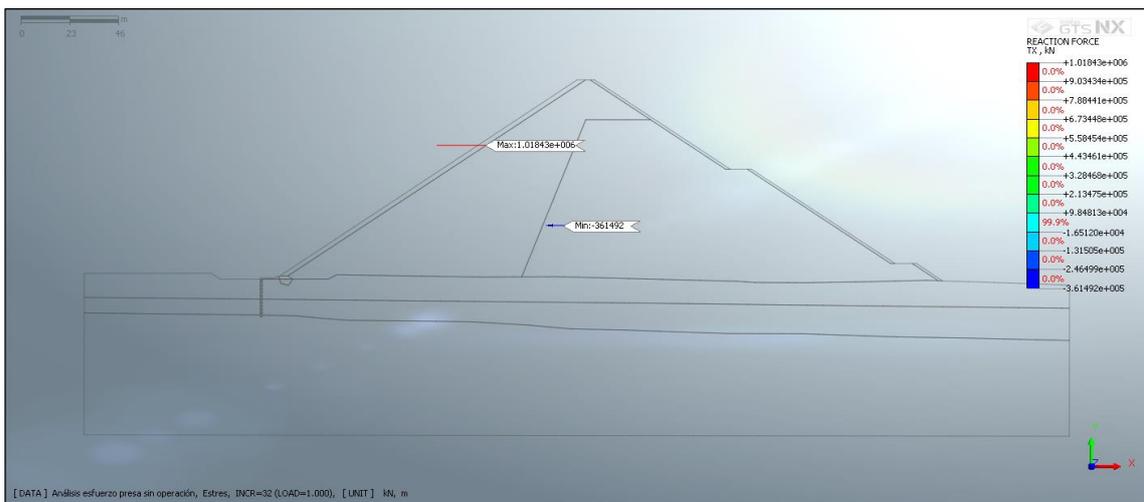
Analisis esfuerzo presa sin operación_Estres_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TX APPLIED FORCE_Current.png



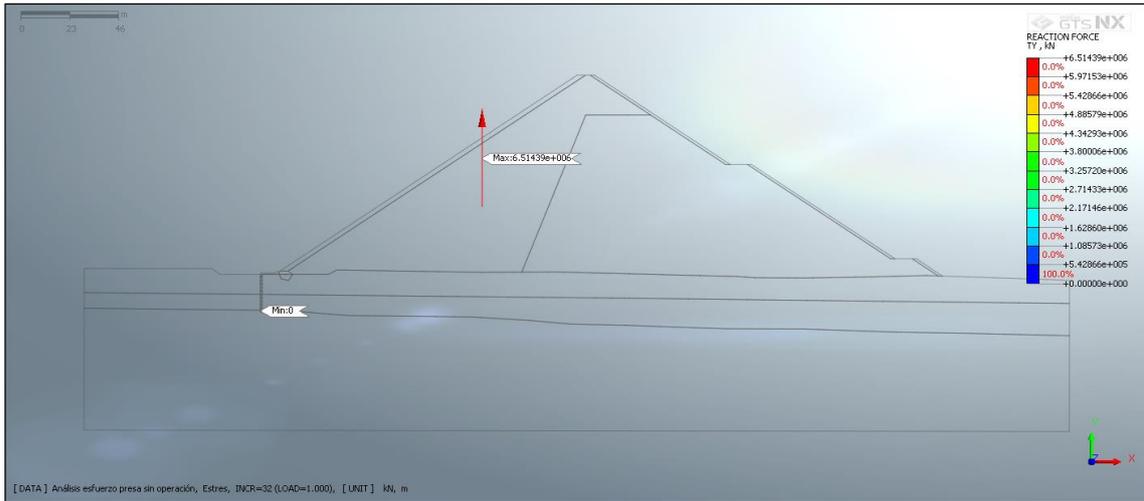
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres_INCR=32 (LOAD=1.000)_Grid Forces_TY APPLIED FORCE_Current.png



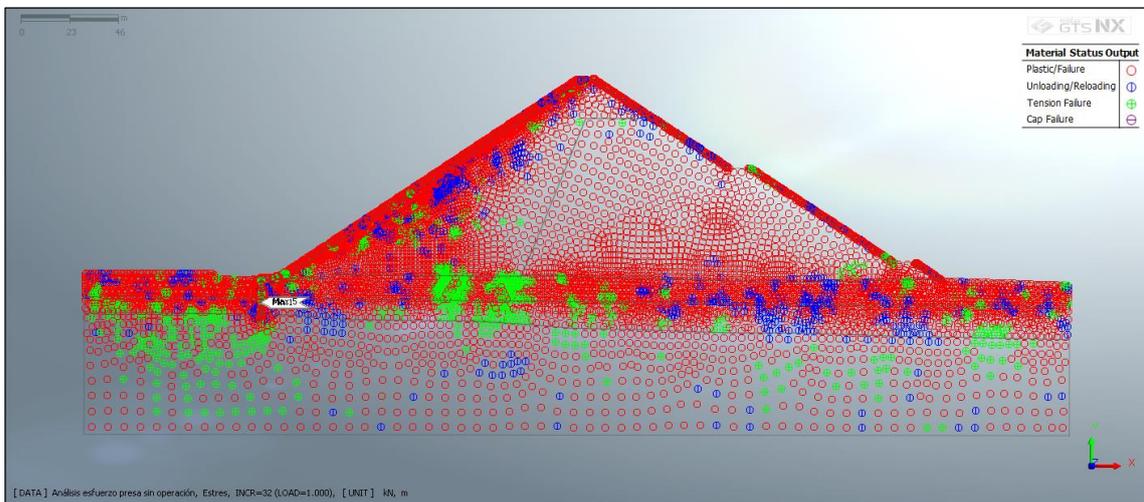
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres_INCR=32 (LOAD=1.000)_Reactions_TOTAL REACTION FORCE_Current.png



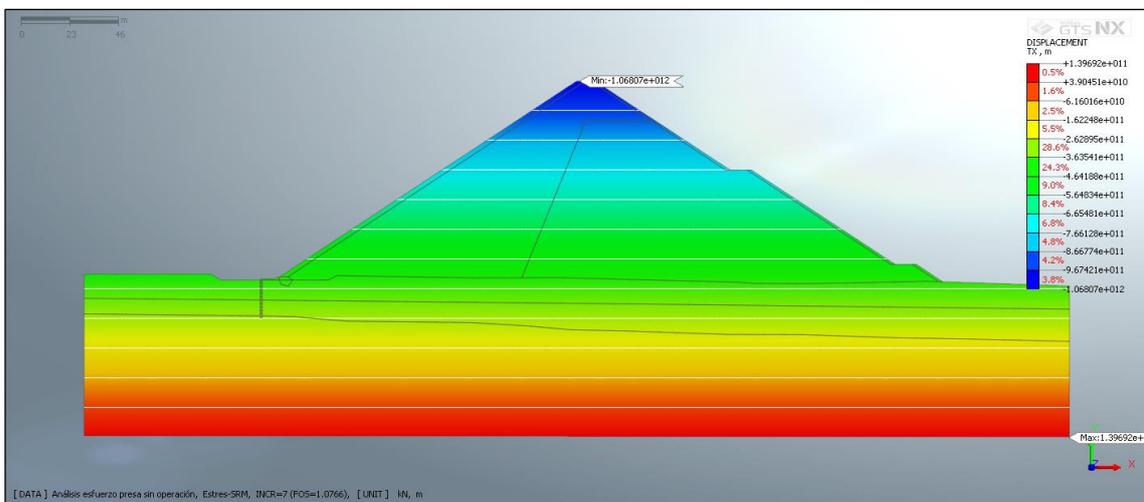
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres_INCR=32 (LOAD=1.000)_Reactions_TX REACTION FORCE_Current.png



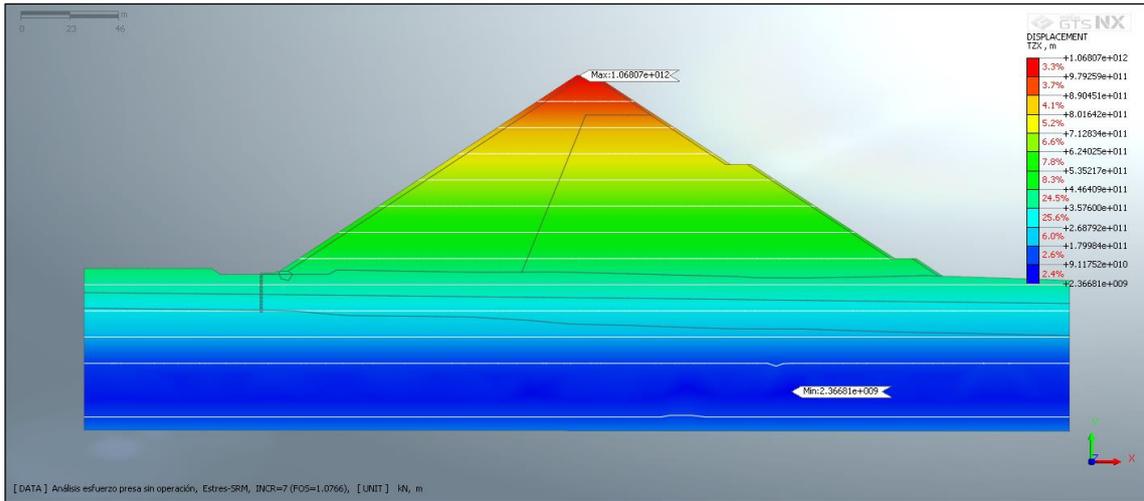
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres_INCR=32 (LOAD=1.000)_Reactions_TY REACTION FORCE_Current.png



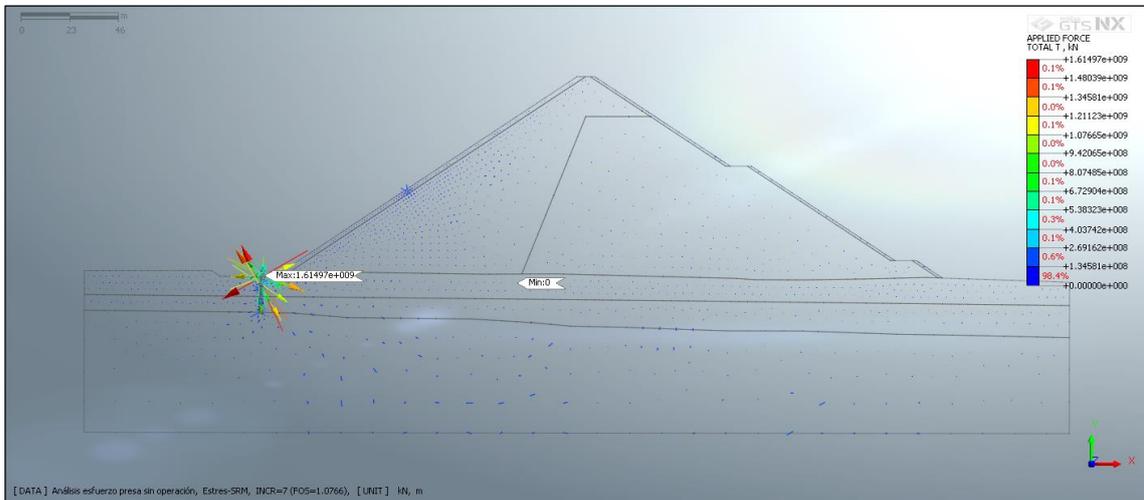
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres_INCR=32 (LOAD=1.000)_Plane Strain Stresses_PLASTIC STATUS_Current.png



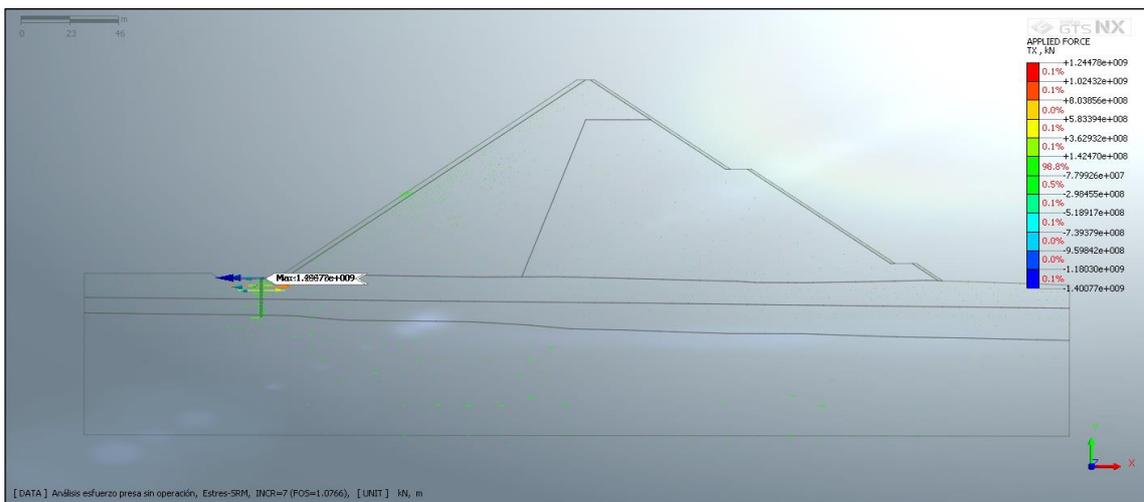
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres-SRM_INCR=7 (FOS=1.1766)_Displacements_TX TRANSLATION (V)_Current.png



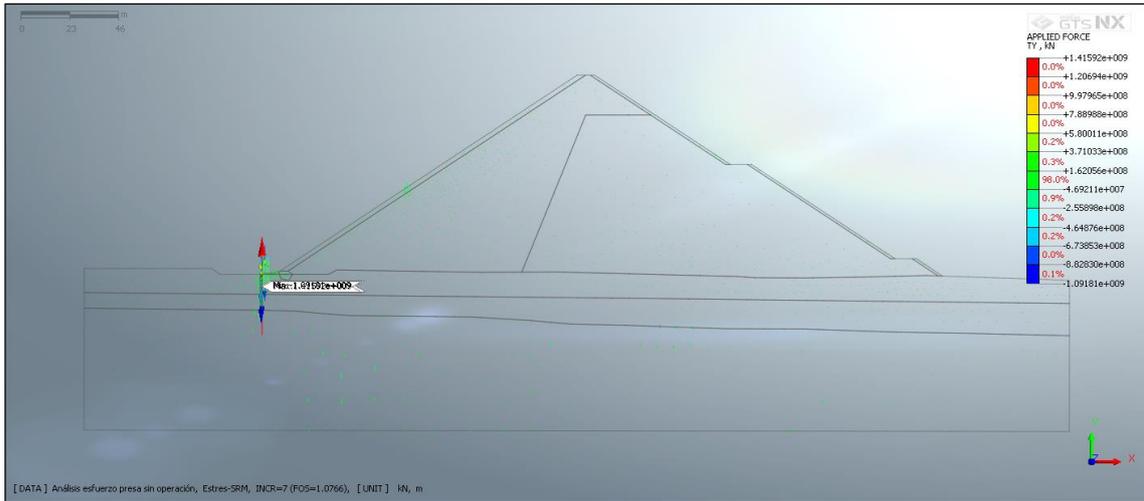
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres-SRM_INCR=7 (FOS=1.1766)_Displacements_TZX TRANSLATION (V)_Current.png



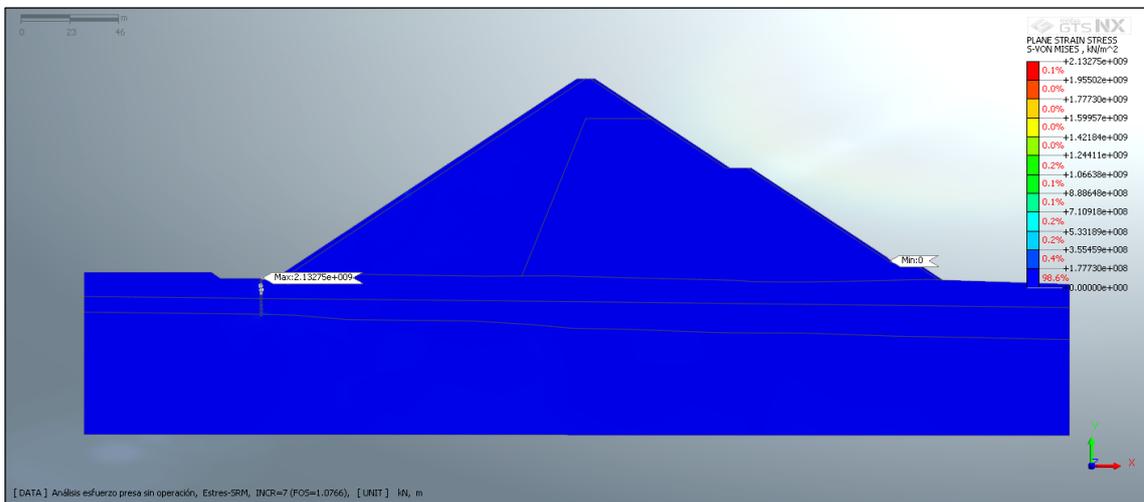
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres-SRM_INCR=7 (FOS=1.1766)_Grid Forces_TOTAL APPLIED FORCE_Current.png



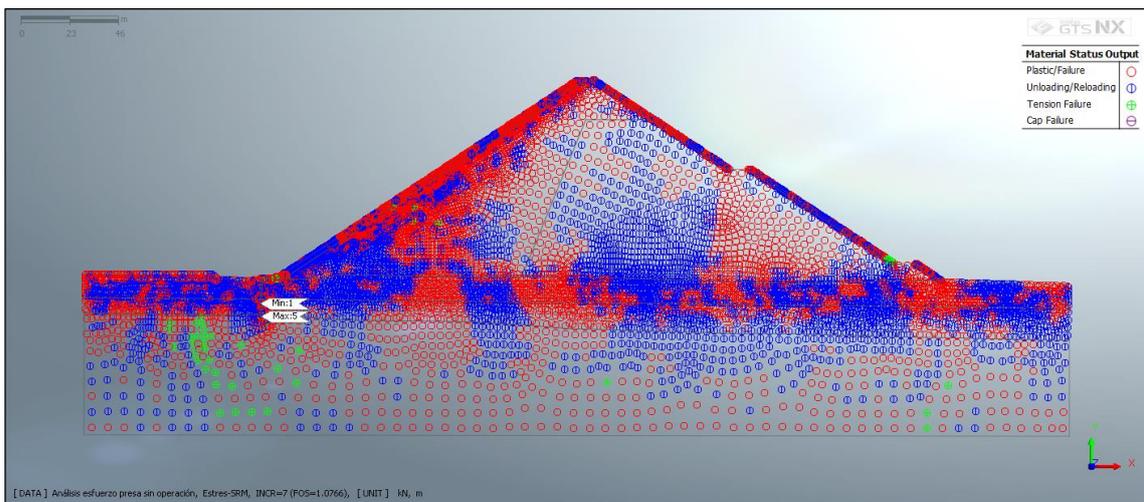
Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres-SRM_INCR=7 (FOS=1.1766)_Grid Forces_TX APPLIED FORCE_Current.png



Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres-SRM_INCR=7 (FOS=1.1766)_Grid Forces_TY APPLIED FORCE_Current.png



Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres-SRM_INCR=7 (FOS=1.1766)_Plane Strain Stresses_S-VON MISES_Current.png



Análisis esfuerzo presa sin operación_Estres-SRM_INCR=7 (FOS=1.1766)_Plane Strain Stresses_PLASTIC STATUS_Current.png