ANÁLISIS TERMOMECÁNICOS DE RELLENOS DE AGREGADOS DE SAL EN GALERÍAS EXCAVADAS EN ROCAS SALINAS.

AGRADECIMIENTOS

Doy las gracias a todas las personas que me han ayudado para que esta tesina llegase a buen puerto. En especial a mi tutor, Sebastià Olivella, sin él esta tesina no hubiera sido posible. También doy las gracias a mi familia y amigos por apoyarme en todo momento.

GRACIAS

RESUMEN

TÍTULO: Análisis termomecánicos de rellenos de agregados de sal en galerías excavadas en rocas salinas.

TUTOR: Sebastià Olivella Pastalle

AUTOR: Abraham Hidalgo Olea

La energía nuclear es una de las fuentes de energía más importante debido a su gran producción energética, a pesar de eso, actualmente ya se está empezando a implementar alternativas que la sustituyan en el futuro. En el proceso de obtención de energía se generan residuos cuyas radiaciones son muy nocivas para las personas y el medio ambiente.

Los residuos más peligrosos son los de alta actividad y no se pueden eliminar, por tanto se deben buscar soluciones alternativas. En la actualidad se está trabajando en el almacenamiento de éstos en galerías profundas excavadas en roca (AGP) de manera que queden aislados. Hay varios tipos de roca que reúnen las condiciones geológicas, físicas y químicas necesarias para almacenar los residuos, entre ellas la sal.

El almacenamiento en galería consiste en la excavación de una galería horizontal en un macizo rocoso salino a varios centenares de metros de profundidad, donde posteriormente se depositan los contenedores de residuos y se rellena el espacio entre éstos y el macizo encajante con agregados de sal triturada procedentes de la excavación. Por último se sella la galería con sal de alto grado de compactación.

En la presente tesina se han estudiado los efectos de la convergencia de la roca por fluencia y la temperatura, sobre la compactación y reducción de la porosidad de los rellenos de sal. Adicionalmente se ha estudiado el efecto de la humedad ambiente y de pequeños contenidos de salmuera en el comportamiento mecánico del relleno.

Para simular el comportamiento del relleno se ha utilizado el programa de elementos finitos CODE_BRIGHT que resuelve problemas acoplados THM (Termo-Hidro-Mecánicos) en medios geológicos. Para visualizar los resultados se ha utilizado el programa GID. Se han llevado a cabo varias simulaciones: en condiciones secas y húmedas, además para cada caso se han realizado diversos análisis de sensibilidad, variando la potencia residual o la humedad ambiente.

Finalmente, a partir del análisis de los resultados obtenidos, se puede extraer ciertas conclusiones que se resumen a continuación:

- Los rellenos de agregados salinos porosos están sometidos a condiciones térmicas, hidráulicas y mecánicas (fenómenos THM). El gran número de interacciones simultáneas que se dan entre estos fenómenos obliga a resolver el problema de manera acoplada.

- Debido a la fluencia de la sal se produce la convergencia natural de las paredes de la galería cerrando el espacio entre los contenedores y el macizo, reduciendo la porosidad del relleno. Este fenómeno permitirá que los rellenos de sal adquieran un comportamiento y propiedades parecidas a las del macizo encajante y se garantice el confinamiento de los residuos.

- La reducción de la porosidad en el relleno produce un aumento de su conductividad térmica (disipa mejor el calor) además de un aumento de las tensiones.

- Las variaciones térmicas producidas por la potencia residual de los residuos, aceleran la fluencia de la sal. A medida que aumenta la potencia, el relleno se calienta más y se realzan los efectos producidos por la temperatura.

- Los cambios en las condiciones hidráulicas transforman el relleno en un material mucho más deformable que en caso seco. La existencia de pequeñas cantidades de salmuera o humedad aceleran la reducción de la porosidad y favorecen que las tensiones en el relleno aumenten. También pueden aparecer fenómenos de migración de vapor.

A partir de las conclusiones se han propuesto una serie de recomendaciones a tener en cuenta en próximos estudios.

ABSTRACT

TITLE: Termomechanical analyses of porous salt backfilling drifts excavated in saline rocks.

AUTHOR: Abraham Hidalgo Olea

TUTOR: Sebastià Olivella Pastalle

The nuclear power is one of the most important sources of energy at present, it is used almost entirely to obtain electricity for the civil consumption. In the process some wastes are generated. Their radiations are very harmful to the humans and the environment.

The high activity radioactive waste are the most dangerous, and cannot be eliminated, therefore alternative solutions must be found. A lot of studies have been done about the storage of these residues at deep drifts excavated in saline media, and keep them isolated. This concept of storage is called AGP. There are several types of rocks that assemble the geological, physical and chemical conditions to store the wastes. The salt formations are suitable to dispose them.

The drift emplacement considers the excavation of a horizontal gallery in saline formations several hundreds of meters depth. Later the waste containers are settled and the space between the host rock and them is backfilled with crushed salt from the excavation. Finally the drift is sealed subsequently. In this work has been studied the effects of the temperature and the rock's convergence due creep deformation on compaction and the porosity reduction of crushed salt backfills. Additionally, the effect of moisture and small contents of brine in the aggregate's mechanical behaviour have been studied.

To simulate the backfill behaviour the program of finite elements, CODE_BRIGHT, has been used. It solves coupled problems THM (Thermo-Hydro-Mechanical) in geological media. The behaviour of the backfill is represented by means the constitutive model for crushed salt, presented by Olivella and Gens (2002). GID has been used to visualize the results. Several simulations have been done: in dry and wet conditions, besides, for every case diverse analyses of sensitivity have been carried out, changing the residual power or the moisture content.

Finally, from the analysis of the results, it is possible to draw some conclusions that are summarized here: ·

- The backfills of saline porous aggregates are subjected to thermal, hydraulic and mechanical conditions (THM phenomena). The great number of simultaneous interactions between these phenomena forces to solve them in a coupled way.

- Due to the creep deformation of the salt, takes place the natural convergence of the drifts walls, closing the space between the containers and the host rock. The porosity of the backfill is reduced. This phenomenon will permit that the backfill tends to develop behaviour similar to the host rock and now the waste isolation is guaranteed. The reduction of the porosity of the backfill produces variations in its thermal conductivity and stresses.

- Thermal variations produced by the residual power of the radioactive waste, enhance the creep deformation of salt. As the power increases the backfill warms up more and the processes dependent of the temperature are amplified.

- Changes in hydraulic conditions transform the backfill in a more deformable material than in dry case. The existence of small quantities of brine or moisture accelerates the reductions of the porosity and the stresses in the backfill increase. In the wet case the backfill becomes more compacted, and the phenomena of vapour appear.

From the conclusions some recommendations to take into account on further studies have been proposed.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS i
RESUMEN ii
ABSTRACT iii
ÍNDICE iv
ÍNDICE DE FIGURAS v
ÍNDICE DE TABLAS viii
1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES 1
2. OBJETIVOS 4
3. METODOLOGÍA 5
4. FORMULACIÓN USADA EN EL MODELO 6
4.1. ECUACIONES DE BALANCE 6
4.2. ECUACIONES CONSTITUTIVAS 7
4.3. RESTRICCIONES DE EQUILIBRIO 7
4.4. ECUACIONES DEL MODELO CONSTITUTIVO 7
5. CODE_BRIGHT 10
5.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL CODE_BRIGHT 10
5.2. SOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES EN CODE_BRIGHT 10
5.3. PREPROCESO Y POSTROCESO MEDIANTE GID 11
5.3.1. PREPROCESO 11
5.3.2. POSTPROCESO 13
6. DESCRIPCIÓN DEL MODELO 14
7. ANÁLISIS EN AMBIENTE SECO 17
7.1. ANÁLISIS DEL CASO BASE 17
7.1.1. RESULTADOS TÉRMICOS 18
7.1.2. RESULTADOS MECÁNICOS 21
7.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 28
7.2.1. RESULTADOS TÉRMICOS 29
7.2.2. RESULTADOS MECÁNICOS 32
8. ANÁLISIS EN AMBIENTE HÚMEDO 38
8.1. ANÁLISIS DEL CASO BASE 39
8.1.1. RESULTADOS TÉRMICOS 39
8.1.2. RESULTADOS HIDRÁULICOS 42
8.1.3. RESULTADOS MECÁNICOS 47
8.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD 55
8.2.1. RESULTADOS TÉRMICOS 55
8.2.2. RESULTADOS MECÁNICOS 57
8.2.3. RESULTADOS HIDRAÚLICOS 62
9. CONCLUSIONES 65
10. REFERENCIAS 68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Representación esquemática de los tests “in situ” TSDE. 1

Figura 1.2 Excavación de la galería para un ensayo TSDE. 2

Figura 1.3 Detalle del proceso de relleno de la galería en un experimento TSDE. 3

Figura 4.1 Mecanismo de deformación tipo DC. 8

Figura 4.2 Mecanismo de deformación tipo FADT. 8

Figura 5.1 Detalle de la interfaz de GID. 11

Figura 5.2 Ventanas principales de la interfaz de CODE_BRIGHT en GID. 12

Figura 6.1 Detalle de la geometría del modelo, distribución de los materiales, y la malla utilizada. 14

Figura 6.2 Detalle de los 6 nodos de un elemento triangular cuadrático. 14

Figura 6.3 Condiciones de contorno e iniciales consideradas en el modelo. 16

Figura 7.1 Situación de los puntos de medida considerados en el relleno. 17

Figura 7.2 Vectores de flujos de calor generados por una potencia residual de 735W/m, el factor de escala es de 0,1. 19

Figura 7.3 Evolución de la temperatura en varios puntos para P=735W/m. 19

Figura 7.4 Distribución de temperaturas para P=735W/m pasados 0, 22, 185 y 3.500 días de simulación. 20

Figura 7.5 Evolución de la porosidad en los puntos de medida del relleno durante el tiempo de simulación, para 735W/m. 21

Figura 7.6 Variación de la porosidad en el relleno para P=735W/m pasados 0, 140, 1.400 y 3.500 días. 22

Figura 7.7 Evolución de la conductividad térmica del relleno para P=735W/m. 23

Figura 7.8 Evolución de la porosidad y de la conductividad térmica en el relleno para P=735W/m. 23

Figura 7.9 Evolución de los desplazamientos en varios puntos del relleno para P=735W/m. 24

Figura 7.10 Distribución de desplazamientos en el relleno para P=735W/m, pasados 0, 300, 1.400 y 3.500 días de simulación. 25

Figura 7.11 Distribución de vectores de tensiones pasados 3.500 días para P=735W/m. 26

Figura 7.12 Evolución de las tensiones en la zona superior del canister para P=735W/m. 26

Figura 7.13 Distribución de tensiones en el relleno pasados 0, 185, 1.400 y 3.500 días, P=735W/m. 27

Figura 7.14 Correlación entre la temperatura máxima en el canister y la potencia residual. 28

Figura 7.15 Correlación entre la porosidad final encima del canister y la potencia introducida. 28

Figura 7.16 Evolución de la temperatura en el canister para potencias residuales de 140, 368, 735 y 1.085W/m. 29

Figura 7.17 Representación mediante vectores de los flujos de calor producidos en el modelo para P=140, 368, 735 y 1.085W/m. 30

Figura 7.18 Distribución de temperaturas para P=140, 368, 735 y 1.085W/m a los 3.500 días de simulación. 31

Figura 7.19 Evolución de la porosidad en el relleno para diferentes potencias residuales. 32

Figura 7.20 Distribución de la porosidad en el relleno para P=140, 368, 735 y 1.085W/m y 3.500 días de simulación. 33

Figura 7.21 Evolución de los desplazamientos en la zona cercana al canister para las cuatro potencias consideradas. 34

Figura 7.22 Distribución de los desplazamientos en el modelo para P=140, 368, 735 y 1.085W/m y 3.500 días. 35

Figura 7.23 Evolución de las tensiones en la zona superior del canister. 36

Figura 7.24 Distribución de las tensiones en el modelo para P=140, 385, 735 y 1.085W/m y 3.500 días. 37

Figura 8.1 Vectores de flujos de calor para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 40

Figura 8.2 Distribución de los flujos de calor para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 40

Figura 8.3 Distribución de temperaturas para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 41

Figura 8.4 Evolución de la temperatura en el relleno para P=140W/m y Pl=-10MPa.. 41

Figura 8.5 Distribución del grado de saturación en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 43

Figura 8.6 Evolución del grado de saturación en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 43

Figura 8.7 Distribución del grado de saturación en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 0, 360, 1.400 y 3.500 días. 44

Figura 8.8 Evolución de la presión de líquido en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa. 45

Figura 8.9 Distribución de la presión de líquido en el modelo para una P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 0, 55, 180 y 3.500 días. 46

Figura 8.10 Evolución de la porosidad en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa. 48

Figura 8.11 Variación de la porosidad en una sección vertical de la galería, para P=140W/m y Pl=-10MPa. 48

Figura 8.12 Distribución de la porosidad en el modelo para una P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 49

Figura 8.13 Evolución de los desplazamientos en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa. 50

Figura 8.14 Distribución de los desplazamientos en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 51

Figura 8.15 Distribución de tensiones en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 53

Figura 8.16 Evolución de las tensiones en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días. 53

Figura 8.17 Distribución de tensiones en el modelo para una potencia de 140W/m y Pl=-10MPa pasados 0, 200, 1.400 y 3.500 días. 54

Figura 8.18 Evolución de la temperatura en el canister para las tres simulaciones.... 56

Figura 8.19 Evolución de la temperatura en la zona superior del canister para las tres simulaciones. 56

Figura 8.20 Evolución de la porosidad en la zona cercana al canister para las tres simulaciones. 58

Figura 8.21 Variación de la porosidad en una sección vertical de la galería para las tres simulaciones. 58

Figura 8.22 Distribución de la porosidad para los casos húmedos (Pl=-1MPa y Pl=-10MPa) y para el caso seco pasados 3.500 días. 59

Figura 8.23 Evolución de la porosidad en la zona cercana al canister para las tres simulaciones. 60

Figura 8.24 Evolución de las tensiones en la superior al canister para las 3 simulaciones. 60

Figura 8.25 Distribución de los desplazamientos para los casos húmedos (Pl=-1MPa y Pl=-10MPa) y para el caso seco pasados 3.500 días. 61

Figura 8.26 Evolución de la presión de líquido en varios puntos del relleno para las dos simulaciones en ambiente húmedo pasados 3.500 días. 62

Figura 8.27 Distribución de presiones de agua para el caso en que Pl=-10MPa MPa y Pl=-1MPa pasados 3.500 días de simulación. 63

Figura 8.28 Evolución del grado de saturación en varios puntos del relleno para las dos simulaciones en ambiente húmedo pasados 3.500 días. 64

Figura 8.29 Distribución del grado de saturación para el caso en que Pl=-1 MPa y Pl=-10MPa pasados 3.500 días de simulación. 64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.1 Propiedades de los materiales consideradas en el modelo seco..... 15
Tabla 6.2 Condiciones iniciales consideradas en el modelo..... 15
Tabla 8.1 Propiedades de los materiales consideradas en el modelo húmedo..... 38

1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En la actualidad, la energía nuclear es una de las fuentes de energía más importantes, a pesar de que en el siglo XIX se desarrolló con fines militares, actualmente se destina principalmente a la producción de electricidad para el consumo civil.

Cuando un átomo pesado (Uranio o Plutonio) se divide en dos átomos más ligeros, éstos tienen una masa menor que el original, verificando la fórmula de Albert Einstein ($E=MC^2$), se genera energía.

A pesar de que el combustible utilizado en las centrales nucleares puede producir energía durante varios años, llega un momento en que deja de ser útil y se convierte en un residuo.

Los residuos más peligrosos generados en la fisión nuclear son las barras de uranio en las que se generan los isótopos. Este tipo de residuos no pueden eliminarse y permanecen radiactivos durante miles de años, por lo tanto lo mejor es depositarlos en galerías profundas excavadas en roca o antiguas minas. A este tratamiento se le llama almacenamiento geológico profundo (AGP).

Los AGP tienen como finalidad proteger de las radiaciones al ser humano y al medio ambiente, además deben garantizar el aislamiento duradero de los residuos. Por último, los AGP deben resistir y disipar correctamente el calor residual que emite el combustible radioactivo una vez agotado.

Arcilla, granito y sal son las rocas que presentan las mejores condiciones geológicas, físicas y químicas para albergar los residuos.

Esta tesina se centra en el estudio de los agregados salinos como material de relleno de las galerías en las que se depositan los residuos.

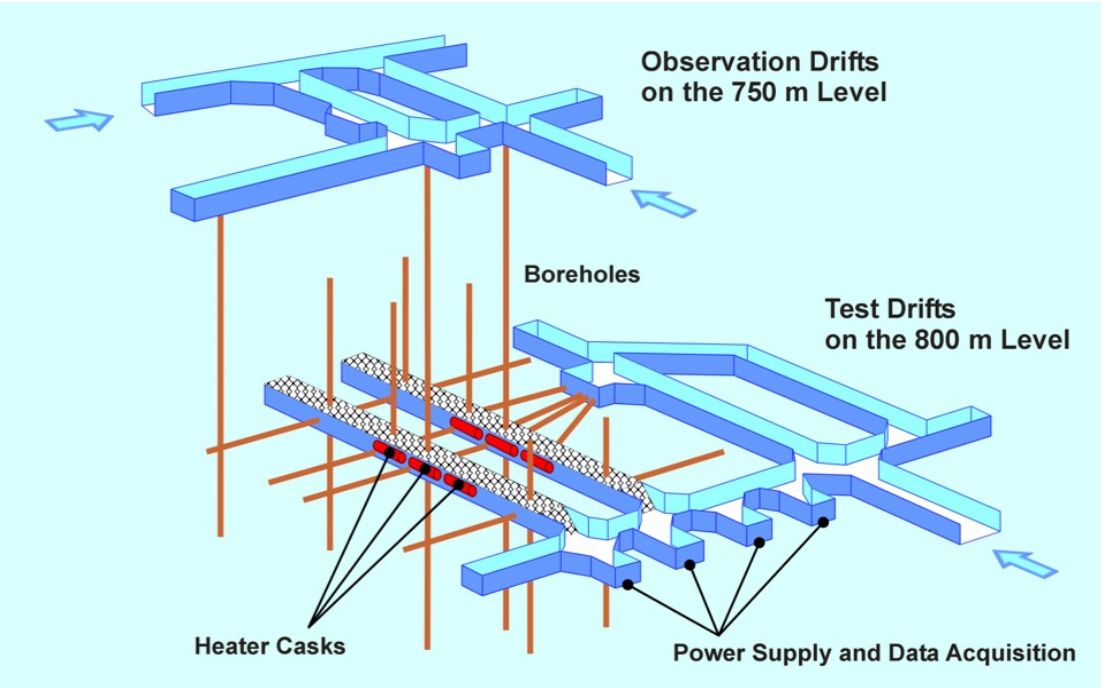

Figura 1.1 Representación esquemática de los tests “in situ” TSDE.

Los macizos salinos son adecuados para almacenar residuos radioactivos porque presentan una permeabilidad y porosidad muy bajas, que garantizan el aislamiento de los residuos durante mucho tiempo.

El material utilizado para el relleno y sellado de las galerías, excavadas en el macizo salino donde se depositan los residuos, son agregados de sal triturada, que a medida que consolidan adquieren un comportamiento y una permeabilidad parecidos al de la roca encajante.

Se han llevado a cabo varias investigaciones y experimentos sobre el emplazamiento de estos residuos en rocas salinas, bajo supervisión y financiación de la Unión Europea. Hay dos conceptos geométricos entorno a los cuales se han desarrollado estas investigaciones: el almacenamiento en sondeo (*borehole emplacement*) y en galería (*drift emplacement*).

El almacenamiento en sondeo fue el primero en desarrollarse, a partir de los experimentos "*in situ*" DEBORA I y DEBORA II realizados en Alemania, (Rothfucs et al, 1996). Este método consiste en la excavación de un agujero vertical en la roca encajante, la disposición de los residuos y el sellado posterior, ver Figura 1.1.

El almacenamiento en galería consiste en realizar una perforación horizontal en la roca encajante (macizo rocoso salino), ver Figura 1.2. Posteriormente se emplazan los contenedores de residuos horizontalmente y se rellena el espacio entre éstos y la roca encajante con sal triturada proveniente de la excavación de la galería. Por último se sella la galería mediante sal con un alto grado de compactación, ver Figura 1.1 y Figura 1.3.

Figura 1.2 Excavación de la galería para un ensayo TSDE.

Se han realizado varios experimentos sobre este tipo de almacenamiento, en concreto el TSDE (Thermal Simulation of Drift Emplacement), que se llevó a cabo

entre 1991 y 1999 en las minas de sal de Asse (Norte de Alemania). Este experimento estaban enmarcado en los proyectos BAMBUS I (Betchothold et al, 1999) y BAMBUS II (Betchothold and Bollingerfer, 2001).

El experimento TSDE fue el primer ensayo a largo plazo realizado "in situ" en sal para experimentar el almacenamiento en galería. El objetivo del ensayo era estudiar los efectos térmicos y mecánicos de un emplazamiento directo de los residuos y así obtener un modelo capaz de describir la respuesta termo-mecánica del relleno de agregados de sal y del macizo rocoso.

El concepto del *"drift emplacement"* está basado en la compactación generalizada del relleno debido a la convergencia de las paredes de la galería. Este proceso se puede ver realzado por la presencia de variaciones de temperatura y eventualmente de salmuera.

Cabe decir que los conceptos de almacenamiento en sondeo y galería utilizan exclusivamente sal como material encajante, de relleno y sellado. Éstos se diferencian de otros sistemas multi-barrera en los que la roca encajante puede ser arcilla o granito, se utilizan arcillas como relleno y hormigón como material de sellado.

Figura 1.3 Detalle del proceso de relleno de la galería en un experimento TSDE.

Un punto muy importante a favor del almacenamiento en galerías excavadas en macizos salinos es el hecho de que el material de relleno y de sellado provienen del mismo macizo. En cambio, en otros sistemas se tienen que aportar materiales, como puede ser el hormigón, caro de por si y que además tiene que transportarse hasta galerías excavadas a cientos de metros de profundidad.

Por lo tanto, el almacenamiento de los residuos radioactivos en rocas salinas es una solución muy interesante que se ha de tener en cuenta en un futuro no muy lejano.

2. OBJETIVOS

Esta tesina tiene como objetivo el análisis del comportamiento termo-mecánico de rellenos de agregados de sal en galerías excavadas en macizos rocosos salinos.

En primer lugar, hay que diferenciar entre la roca encajante (macizo rocoso salino) donde se perfora la galería y el material de relleno (agregados de sal triturada).

En el caso de que el material encajante sea un macizo rocoso salino, debido a la fluencia de la sal, se producirá una convergencia natural de las paredes de la galería cerrando el espacio entre el contenedor de residuos y el macizo rocoso.

Este comportamiento se origina porque la sal es un material altamente viscoso que fluye a tensión constante. Si se producen aumentos de temperatura se aceleran las deformaciones. Inicialmente la sal se comporta de manera elástica, pero si se mantienen las acciones externas, su comportamiento se convierte en viscoplástico y las deformaciones son irreversibles.

La potencia residual de los contenedores de residuos radioactivos dan lugar a incrementos de temperatura. Se emiten un flujo de calor hacia la roca, aumentando la temperatura del relleno y acelerando la fluencia de la sal.

En esta tesina se estudiará el efecto de la temperatura y la convergencia de la roca por fluencia, sobre la compactación y reducción de la porosidad en los rellenos de sal porosa.

Adicionalmente también se va a estudiar el efecto de la humedad ambiente y de los pequeños contenidos de salmuera, en el comportamiento mecánico de los agregados, ya que éstos juegan un papel muy importante. La presencia de agua puede llevar a la destrucción de parte del macizo encajante y a permitir el escape de las radiaciones.

Para poder simular el comportamiento del relleno de sal, y analizarlo posteriormente, se utiliza el programa de elementos finitos CODE_BRIGHT que resuelve problemas acoplados THM (Termo-hidro-mecánicos) en medios geológicos. Para el preproceso y postproceso se utilizará el programa GID.

3. METODOLOGÍA

Para poder alcanzar los objetivos planteados anteriormente se han llevado a cabo diversas fases, que se resumen a continuación:

1. **Revisión bibliográfica para obtener una visión general del problema.**
Se revisa bibliografía relacionada con el tema para crear una idea global del problema.

2. **Elección de los casos en los que se centrará la tesina.**
Se modelizan los casos que mejor representen la realidad de manera simplificada.

3. **Elección de los modelos constitutivos.**
Para llevar a cabo la simulación se utilizan los modelos constitutivos que mejor reproduzcan el comportamiento real de los materiales.

4. **Elección de los instrumentos de trabajo.**
En este punto se trata de elegir la herramienta numérica con la que se resuelve el problema. En el caso de que no se conozca su funcionamiento es necesario un período de aprendizaje. Si el programa de cálculo elegido únicamente resuelve el problema y exporta un archivo de resultados, se necesita otro programa para representarlos.

5. **Diseño de la geometría.**
A partir de la revisión bibliográfica, se dibuja una geometría similar a alguna de las que se llevaron a cabo en los experimentos estudiados.

6. **Introducción de datos.**
Se introducen los datos necesarios para llevar a cabo la simulación, éstos se obtienen a partir de ensayos realizados anteriormente.

7. **Obtención de resultados.**
Se ejecuta el programa y se obtienen resultados con los que realizar el análisis.

8. **Análisis de resultados.**
Se representan los resultados obtenidos, y se analizan de manera que se alcancen los objetivos planteados.

9. **Conclusiones.**
Se extraen conclusiones a partir del análisis de resultados.

4. FORMULACIÓN USADA EN EL MODELO

El modelo que se va a estudiar estará sometido a condiciones termo-hidro-mecánicas, por lo tanto se originan fenómenos del tipo THM. Es un hecho que hay un gran número de interacciones mutuas y simultaneas entre los tres procesos que nos obligan a resolver el problema de manera acoplada.

A continuación se hace una descripción básica de la formulación usada para el flujo multifase no isotermal de salmuera y gas en el medio deformable salino, se puede encontrar una formulación más detalla en Olivella et al, 1996.

Las ecuaciones consideradas para este caso se pueden dividir en cuatro grupos principales:

- **Ecuaciones de balance**
- **Ecuaciones constitutivas**
- **Restricciones de equilibrio**
- **Ecuaciones del modelo constitutivo**

En los siguientes capítulos se hace una breve descripción de las ecuaciones mencionadas anteriormente. En el capítulo 4.4 se describen las ecuaciones correspondientes al modelo constitutivo para los agregados salinos desarrollado por Olivella y Gens, 2002.

4.1. ECUACIONES DE BALANCE

A continuación se hace una descripción básica de las ecuaciones de balance con sus respectivas incógnitas, que serán resueltas mediante el programa de elementos finitos CODE_BRIGHT.

Las ecuaciones de balance se resumen a continuación:

Balance de momento:

$$\nabla \cdot \sigma + b = 0 \qquad (4.1)$$

Divergencia (tensor de tensiones) + (Vector de fuerzas másicas) = Vector (0)

El balance de momento se reduce al equilibrio de tensiones, ya que no se consideran los términos inerciales; incógnita: $U = (U_x, U_y, U_z)$.

Donde sigma es el tensor de tensiones y b es el vector de fuerzas másicas.

Balance de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(E_s\rho_s(1-\phi) + E_l\rho_l S_l\phi_l + E_g\rho_g S_g\phi_g\right) + \nabla \cdot \left(i_c + j_{Es} + j_{El} + j_{Eg}\right) = f^Q \qquad (4.2)$$

$\frac{\partial}{\partial t}$ (Energía interna en fase sólida, liquida y gas) + Divergencia (Flujos totales de energía) = (Iinyección externa de calor); Incógnita: Temperatura $T(^oC)$

Balance de agua:

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\theta_l^w S_l \phi + \theta_g^w S_g \phi\right) + \nabla \cdot \left(j_l^w + j_g^w\right) = f^w \qquad (4.3)$$

$\frac{\partial}{\partial t}$ (Masa de agua en fase liquida y gas) + Divergencia (Flujos totales de agua) = (Aportación externa de calor); Incógnita: presión del líquido $P_t = (MPa)$

4.2. ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Asociadas a la formulación anterior hay una serie de leyes constitutivas que describen las propiedades físicas del medio para el fenómeno considerado. Las ecuaciones constitutivas se encuentran en Olivella et al, 1999, y se enumeran a continuación:

- Curva de retención
- Ley de Darcy
- Ley de Fick
- Ley de Fourier
- Ley de gases ideales
- Ley de Fase

4.3. RESTRICCIONES DE EQUILIBRIO

Las restricciones de equilibrio (Olivella et al, 1999) se enumeran a continuación:

- Solubilidad
- Ley de Henry
- Ley psicométrica

4.4. ECUACIONES DEL MODELO CONSTITUTIVO

Se ha utilizado el modelo constitutivo para los agregados salinos desarrollado por Olivella y Gens, 2002. Éste explica el comportamiento viscoplástico de los agregados de sal.

El modelo se concentra en las deformaciones por fluencia que se producen como consecuencia de un estado de tensiones que se mantiene constante durante un periodo de tiempo muy largo (la fluencia es un proceso que depende del tiempo).

A bajas temperaturas y pequeñas tensiones los mecanismos más importantes de deformación por fluencia están basados en la deformación asistida por fluidos.

El modelo constitutivo se basa en los siguientes mecanismos de deformación:

- **Deformación asistida por fluido** (FADT)
- **Fluencia por dislocaciones** (DC)

El FADT y el DC son los mecanismos dominantes según las condiciones de nuestro deposito y se explican a continuación, en la Figura 4.1 y la Figura 4.2.

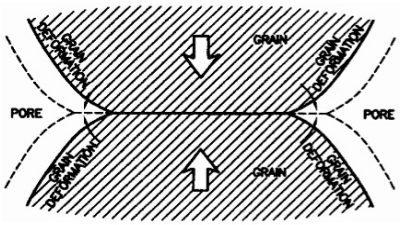

Figura 4.1 Mecanismo de deformación tipo DC.

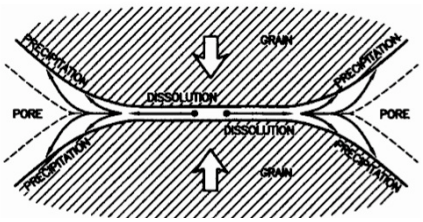

Figura 4.2 Mecanismo de deformación tipo FADT.

La notación DC se refiere al mecanismo intracristalino explicado mediante la teoría de la dislocación. La red cristalina de la sal no es perfecta porque presenta huecos y dislocaciones, ver Figura 4.1. Una tensión desviadora aplicada sobre el cuerpo cristalino causa el movimiento de esas imperfecciones que, macroscópicamente, se verán como deformaciones. Este mecanismo se define como la transformación de un agregado de sal poco compactado, en un material altamente compactado, como la roca.

Las siguientes ecuaciones están basadas en la teoría viscoplástica para medios geológicos:

$$\frac{1}{\eta_{DC}^{v}} = A(T) g_{DC}^{v}(e) \ , \ \frac{1}{\eta_{DC}^{d}} = A(T) g_{DC}^{d}(e) \qquad (4.4)$$

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^{DC}}{dt} = \frac{1}{\eta} \left\langle \phi(F) \right\rangle \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}^{'}} \qquad (4.5)$$

$$F = G = \sqrt{q^2 + \left(\frac{p}{\alpha_p} \right)^2} \qquad (4.6)$$

Donde ϕ es una función escalar de flujo que aumenta constantemente con F (función de fluencia) y representa una medida de velocidad de deformación viscoplástica. G es el potencial viscoplástico y $1/\eta$ es la fluidez de la roca.

$$\Phi(F) = F^n \qquad (4.7)$$

$$\eta = \eta_{DC}^{v} \ , \ \alpha_p = \left(\frac{\eta_{DC}^{v}}{\eta_{DC}^{d}} \right)^{1/(n+1)} \qquad (4.8)$$

$$g_{DC}^{v}(e) = 3(g-1)^n f \qquad (4.9)$$

$$g_{DC}^{d}(e) = \left(\sqrt{\frac{1+g+g^2}{3}} \right)^{n-1} \left(\frac{2g+1}{3} \right) f + \frac{1}{\sqrt{g}} \qquad (4.10)$$

Las funciones $g_{DC}^{v}(e)$ y $g_{DC}^{d}(e)$ dependen de la geometría de los granos de sal y por consiguiente del índice de poros, g y f se describen más adelante.

FADT es el mecanismo basado en la migración de sal a través de la fase líquida presente en los poros. Este fenómeno se produce entre contactos de granos de sal o entre contactos y los poros, ver Figura 4.2. Las deformaciones de los granos se producen por disolución, migración, y precipitación de sal desde zonas de concentración de tensiones a zonas de menores tensiones.

Para los agregados porosos de sal sometidos a condiciones de confinamiento, la migración va desde los contactos a los poros provocando una reducción volumen.

La ecuación final para el mecanismo FADT expresa la velocidad de deformación como una función de múltiples variables: tensiones, índice de poro, tamaño de poros, temperatura y propiedades del medio.

Generalización del modelo mediante una ley viscoelástica:

$$\frac{d\varepsilon_{ij}^{FADT}}{d_t} = \frac{1}{2\eta_{FADT}^{d}}(\sigma'_{ij} - p'\delta'_{ij}) + \frac{1}{3\eta_{FADT}^{d}} p'\delta'_{ij} \qquad (4.11)$$

Con:

$$\frac{1}{\eta_{FADT}^{v}} = \frac{16B(T)\sqrt{S_l}}{d_0^3} g_{FADT}^{v}(e) = C(T,S_l,d_0) g_{FADT}^{v}(e) \qquad (4.12)$$

$$\frac{1}{2\eta_{FADT}^{d}} = \frac{16B(T)\sqrt{S_l}}{d_0^3} g_{FADT}^{v}(e) = C(T,S_l,d_0) g_{FADT}^{d}(e) \qquad (4.13)$$

La función $C(T,S_l,d_0)$ incluye la información referente al tamaño de grano, contenido de salmuera y temperatura.

Las funciones g_{FADT}^{v} y g_{FADT}^{d} contienen la dependencia del índice de poros:

$$g_{FADT}^{v}(e) = \frac{3g^2 e^{3/2}}{1+e} \qquad g_{FADT}^{d}(e) = \frac{g^2}{1+e} \qquad (4.14)$$

Siendo g y f:

$$g = \frac{1}{(1-f)^2} = \frac{d^2}{x^2} \qquad f = \sqrt{\frac{2e}{3(1-e^{3/2})(1+e)}} = \frac{s\sqrt{2}}{d} \qquad (4.15)$$

Por lo tanto las funciones g_{FADT}^{v} y g_{FADT}^{d}, g y f son dependientes de la geometría. En principio, cambios en la forma de los granos modificarían estas funciones, mientras otras variables permanecerían constantes.

5. CODE_BRIGHT

CODE_BRIGHT es una herramienta de cálculo diseñada para resolver problemas acoplados: Térmico, hidráulico y mecánico; en medio geológico mediante elementos finitos. En un principio el código del programa se escribió (en FORTRAN) en base a una nueva teoría general para el medio salino. Actualmente el programa se ha generalizado para modelar procesos termo-hidro-mecánicos (THM) acoplados en medio geológico.

A continuación se explican diversos aspectos del programa CODE_BRIGHT, (la formulación completa se encuentra en Olivella et al, 1996).

5.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL CODE_BRIGHT

Las principales características del programa están resumidas a continuación:

- **Se pueden resolver tanto problemas acoplados como desacoplados.**
- **Se pueden realizar varios tipos de análisis, en una, dos o tres dimensiones.**
- **Se pueden elegir varios tipos de elementos.**
- **Leyes constitutivas:** Cada ley se define como un conjunto de parámetros y se pueden establecer diferentes relaciones entre ellas.
- **Condiciones de contorno:**
    - Problema mecánico: Se pueden imponer fuerzas y desplazamientos en cualquier dirección o en cualquier nodo.
    - Problema hidráulico: Se puede imponer un flujo de masas o de agua, aire o una presión de liquido/gas en cualquier nodo.
    - Problema térmico: Se puede imponer un flujo de calor y temperatura en cualquier nodo.
- **Criterio de convergencia:** Se toman tolerancias del error absoluto y relativo independientes para cada incógnita.
- **Opciones de salida de datos:** Se puede obtener la evolución de las variables en los nodos o en los elementos. Mapas de contorno del domino de las soluciones.

5.2. SOLUCIÓN DE SISTEMAS DE ECUACIONES EN CODE_BRIGHT

CODE_BRIGHT soluciona las siguientes ecuaciones:

- **Equilibrio de tensiones** (desplazamientos).
- **Balance de masas de agua** (presión del líquido).
- **Balance de masas de aire** (presión de gas).
- **Balance de energía** (temperatura).

Cada ecuación tiene asociada una variable (escrita entre paréntesis), que resulta ser la incógnita obtenida al resolver la correspondiente ecuación. El programa se puede utilizar para resolver problemas de una sola ecuación. En caso de querer resolver más de una, las ecuaciones se resolverán juntas. Normalmente los problemas requieren pasos de tiempo variables y un método iterativo s, normalmente el sistema resultante de ecuaciones es no-simétrico.

5.3. PREPROCESO Y POSTROCESO MEDIANTE GID

CODE_BRIGHT utiliza un programa informático llamado GID para el preproceso y el postproceso, el programa GID fue desarrollado por el CIMNE (Center for Numerical Methods in Engineering).

GID es una interfaz de usuario, gráfica e interactiva, que se usa para la definición, preparación y visualización de todos los datos relacionados con las simulaciones numéricas. Mediante GID se puede ver de manera muy sencilla la definición geométrica del modelo, los materiales, las condiciones iniciales, las de contorno, información sobre otros parámetros y los resultados.

El programa puede generar mallas de elementos finitos y escribir la información en un lenguaje comprensible para programas como CODE_BRIGHT. También es posible realizar simulaciones numéricas directamente desde el sistema y ver resultados sin tener que transferirlos.

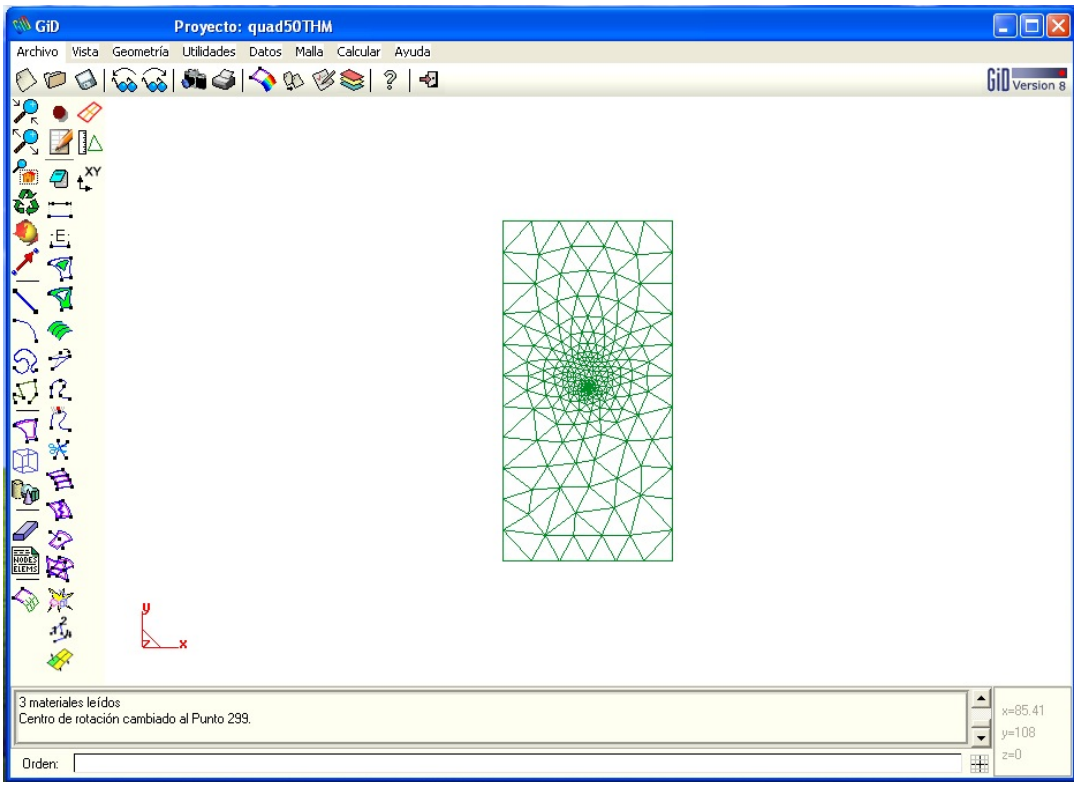

Figura 5.1 Detalle de la interfaz de GID.

5.3.1. PREPROCESO

CODE_BRIGHT utiliza el programa GID para el preproceso, mediante su interfaz se puede dibujar la geometría del problema con puntos, líneas y superficies o importarla desde un archivo en CAD de una manera muy sencilla, ver Figura 5.1.

Una vez introducida la geometría, se pasa a utilizar las funciones del CODE_BRIGHT, que al estar integrado en GID, también presenta una interfaz bastante clara (para introducir los datos únicamente se tiene que rellenar las casillas en blanco).

Esta interfaz consta de cuatro ventanas principales, donde únicamente hay que introducir los parámetros necesarios para la simulación en las casillas en blanco, éstas se enumeran a continuación y se pueden ver en la Figura 5.2:

- **Condiciones de contorno e iniciales.**
- **Datos del intervalo.**
- **Datos generales del programa.**
- **Parámetros de los materiales.**

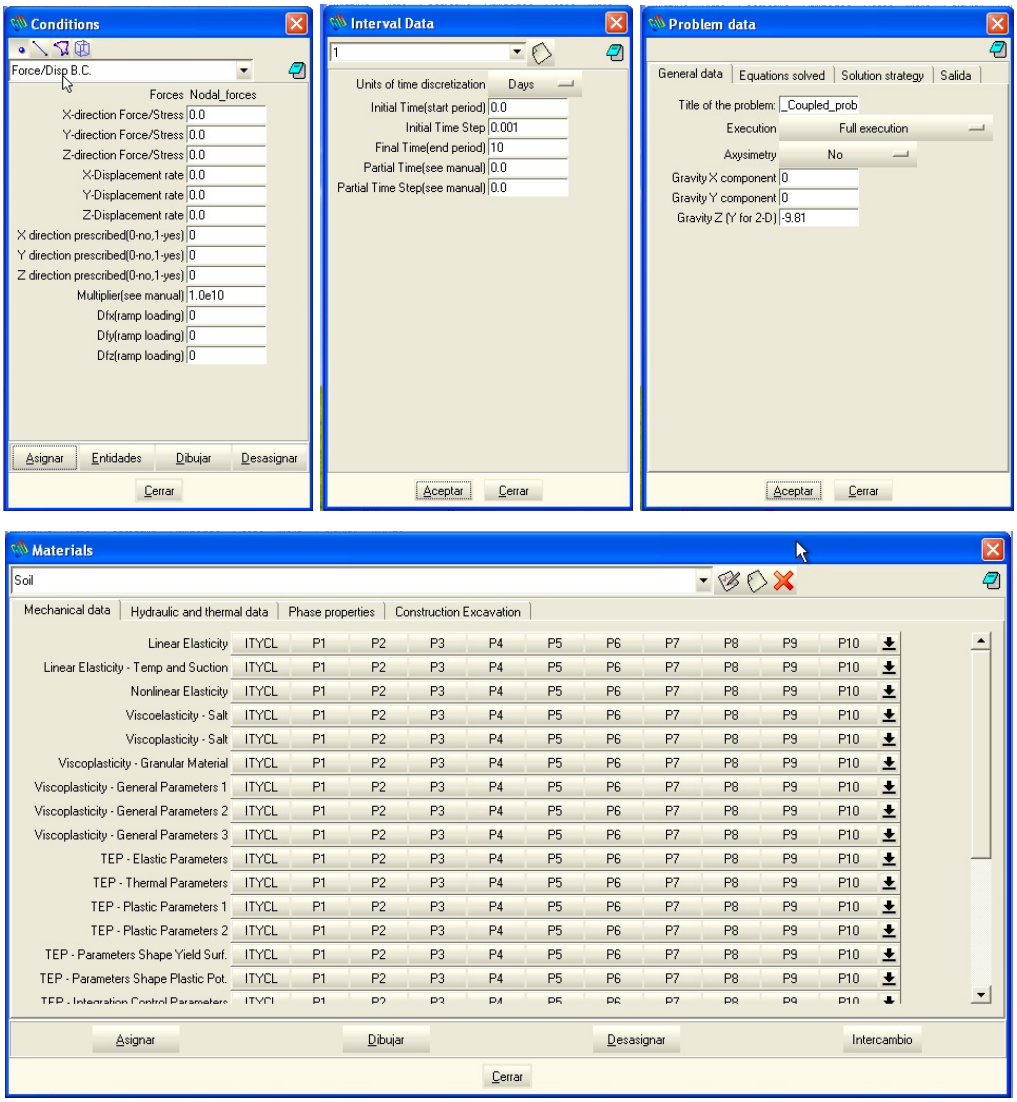

Figura 5.2 Ventanas principales de la interfaz de CODE_BRIGHT en GID.

Una descripción más detalla de la interfaz del CODE_BRIGHT se encuentra en el manual de usuario del programa, (Departamento de ingeniería del terreno, 2001).

5.3.2. POSTPROCESO

Una vez ejecutado el programa CODE_BRIGHT, GID lee los resultados de la simulación y nos permite visualizar los siguientes resultados:

- **Geometría:**
  GID visualiza la malla, las propiedades y contornos de las superficies, además se puede visualizar la malla deformada de acuerdo a alguna variable vectorial.

- **Mínimos y máximos:**
  El programa permite ver los valores máximos y mínimos de la variable de la malla actual.

- **Vectores:**
  Se puede representar una distribución de vectores de acuerdo a la matriz de variables de cada nodo, mostrando sus magnitudes y direcciones.

- **Campo de contornos:**
  GID representa las variables a través de isosuperficies o contornos que comprenden valores entre un rango.

- **Líneas de contorno:**
  Esta visualización se parece a la anterior, pero en este caso se sustituyen las isosuperfícies por isolíneas, donde la línea comprende puntos del mismo valor.

6. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Se ha utilizado un modelo en 2D de un emplazamiento de residuos radioactivos en una galería (tipo DRIFT) excavada en un macizo de roca salina para simular el comportamiento termo-mecánico del relleno.

Se han considerado tres materiales: El macizo rocoso encajante (Rock Salt), el relleno de agregados salinos porosos (Backfill) y el canister (contenedor de los residuos radioactivos, también llamado calentador cuando se realizan experimentos in situ). La potencia residual inicial del contenedor de residuos da lugar a incrementos de temperatura, en el modelo también se simulan los flujos de calor desde el canister hacia el macizo rocoso.

La geometría del modelo, definida por puntos, líneas y superficies, se encuentra en la Figura 6.1.

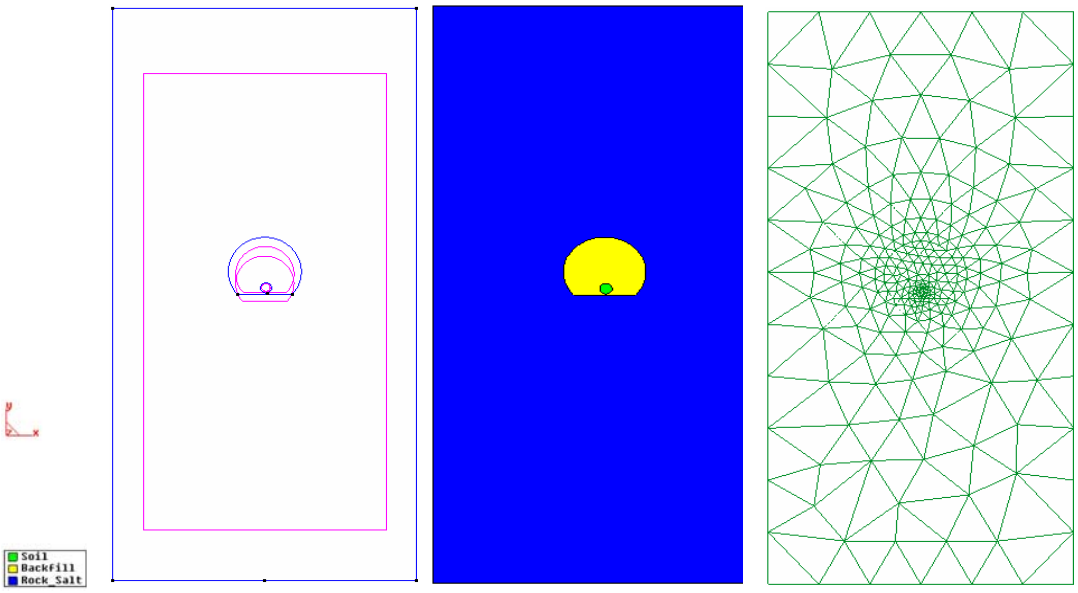

Figura 6.1 Detalle de la geometría del modelo, distribución de los materiales, y la malla utilizada.

La malla utilizada en la simulación modelo consta de 482 elementos triangulares cuadráticos (ver Figura 6.2) y 999 nodos, el tamaño de los elementos es variable. Se han impuesto unos elementos más pequeños en la zona del relleno con el fin de obtener unos resultados más precisos en esos puntos. La malla también es más densa en la zona del calentador para modelizar mejor el flujo de calor introducido, ver Figura 6.1.

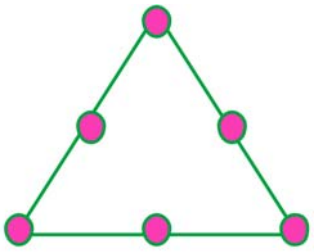

Figura 6.2 Detalle de los 6 nodos de un elemento triangular cuadrático.

Las propiedades de cada uno de los materiales se detallan en la Tabla 6.1:

	UNIDADES	RELLENO	MACIZO ROCOSO	CANISTER
DEFORMACIONES ELÁSTICAS				
Módulo de Young E	MPa	200	25.000	250.000
Módulo de Poisson	-	0,27	0,27	0,27
DEFORMACIONES VISCOPLÁSTICAS				
Fluidity (AB)	1/s	0,005	0,2e-5	-
Energía de activación (QB)	J/mol	54.000	54.000	-
N	-	5	5	-
COMPORTAMIENTO TÉRMICO				
Coeficiente de expansión térmica (α_s)	ºC^{-1}	4,2e-5	4,2e-5	1e-5
Conductividad térmica sólido (λ_s)	J/s/ºC/m	5,73	5,73	10
(θ_s)			0,215e-4	0,75e-4
(λ_g)		0,1	0,1	-
(λ_l)		0,6	0,6	-
Calor especifico del sólido (CS)	J/kg	855	855	500

Tabla 6.1 Propiedades de los materiales consideradas en el modelo seco.

Condiciones de contorno (ver Figura 6.3):

- Temperatura fija de $36,4^{\circ}C$ en los contornos exteriores del dominio.
- Desplazamientos horizontales impedidos $U_x = 0$ en los planos $(x = 0, y, z)$.
- Desplazamientos verticales impedidos $U_y = 0$ en los planos $(x, y = 0, z)$.
- Tensión vertical fija $S_y = -10MPa$ para el plano $(x, y_{\max}, z)$.
- Tensión horizontal fija $S_x = -10MPa$ para el plano $(x_{\max}, y, z)$.
- Potencias residuales en el canister que van desde $140W/m$ hasta $1085W/m$.

Las condiciones iniciales consideradas se resumen en la Tabla 6.2:

	UNIDADES	RELLENO	MACIZO ROCOSO	CANISTER
Tensión inicial (σ_0)	MPa	-0,001	-10,0	-0,001
Temperatura inicial (T_0)	ºC	36,4	36,4	-
Porosidad inicial (ϕ_0)	-	0,31	0,001	0,00001

Tabla 6.2 Condiciones iniciales consideradas en el modelo.

- Se ha considerado una tensión uniforme de $10MPa$ en todo el dominio.
- El tiempo de modelado ha sido 3.500 *días* (aproximadamente 10 años).

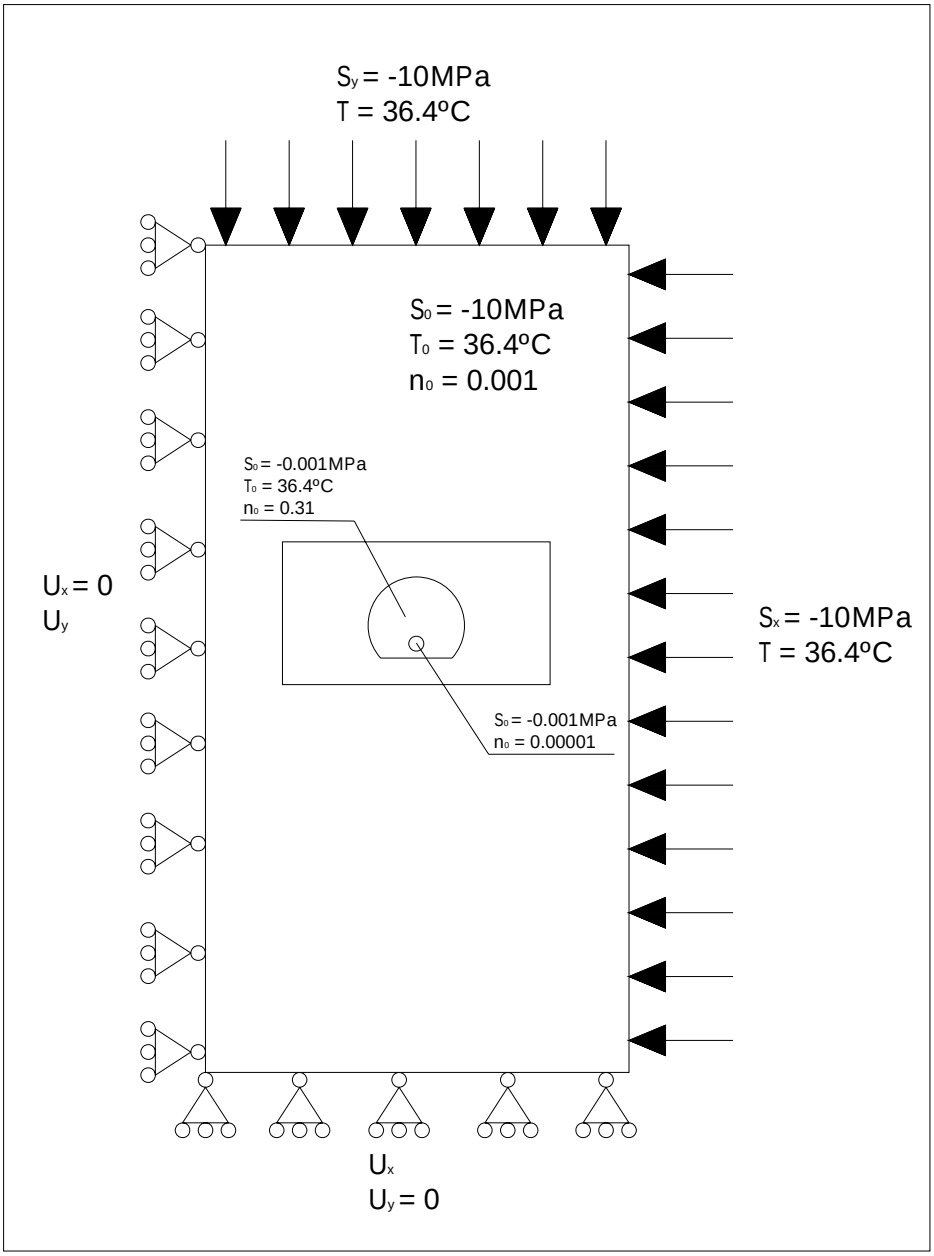

Figura 6.3 Condiciones de contorno e iniciales consideradas en el modelo.

7. ANÁLISIS EN AMBIENTE SECO

En este apartado se analiza el comportamiento del relleno de agregados de sal en ambiente seco, parecido al que se puede encontrar en las minas de sal de Alemania donde se llevaron a cabo los primeros ensayos DEBORA y TDSE.

La porosidad inicial del macizo de sal corresponde a valores muy bajos, típicos de porosidades residuales o no conectadas. El relleno de sal, que proviene de la trituración de la roca al realizar la excavación de la galería, presentará una porosidad mucho mayor que el macizo rocoso.

El mecanismo de deformación que interviene en este problema será únicamente del tipo DC, todas las deformaciones que presente el relleno se originarán por la la acción de la convergencia natural de la roca y los efectos de la variación de temperatura.

7.1. ANÁLISIS DEL CASO BASE

El proceso de simulación consta de dos etapas:

- La primera etapa dura alrededor de 10 días, se considera una presión litostática de -10MPa y no se aplica ningún tipo de calor. Se produce una relajación de las tensiones en el sistema.

- En la siguiente etapa se introduce el flujo de calor (cuyas unidades serán W por metro de canister) que se mantendrá constante hasta alcanzar el tiempo de simulación deseado.

En ambas etapas se utiliza el modelo viscoplástico que simula las deformaciones plásticas debidas a la fluencia de la sal.

En este apartado se analizan los resultados obtenidos para el caso en que la potencia residual es de 735W/m, el tiempo de simulación es de 3.500 días y la temperatura inicial en el canister es de 36,4ºC. Al final de la simulación se alcanzan los 149ºC.

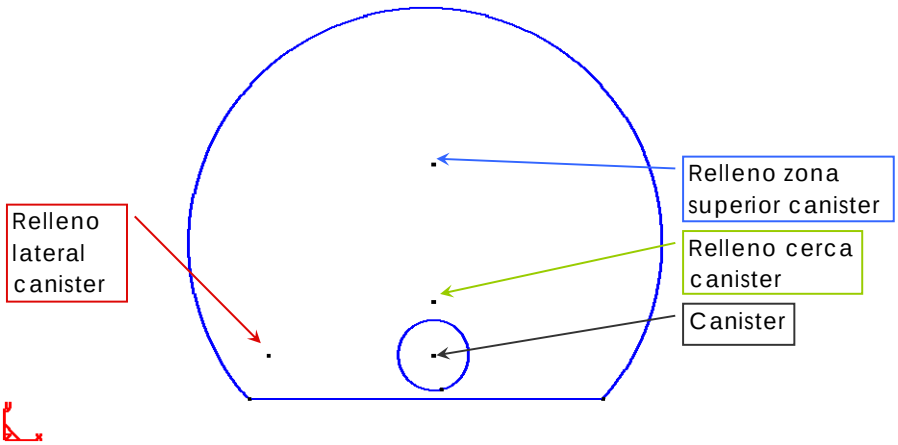

Figura 7.1 Situación de los puntos de medida considerados en el relleno.

Con la finalidad de poder comparar los resultados obtenidos para diferentes potencias residuales, éstos se toman en puntos concretos del relleno, en este caso se toman cuatro puntos fijos de la geometría. Por ejemplo, un punto de medida en

el centro del calentador para conocer la temperatura máxima alcanzada durante la simulación. La situación geométrica de dichos puntos está representada en la Figura 7.1**.**

En la situación inicial la porosidad del relleno es 0,31. A medida que la simulación avanza los valores de la porosidad disminuyen, alcanzándose los valores mínimos en las zonas más próximas al canister ya que son las más afectadas por la variación de temperatura. El valor de la porosidad inicial en el macizo rocoso es de 0,001 un valor muy bajo, típico de porosidades residuales y zonas de porosidad no conectada.

7.1.1. RESULTADOS TÉRMICOS

A partir de los 10 días de simulación se introduce en el modelo la potencia residual, en este caso es de 735W/m. En la Figura 7.2 se ven los flujos de calor representados como flechas, éstos tienden a ser mayores en la zona de la roca salina encajante que en la zona del relleno.

Los flujos de calor producidos por el canister, provocan un aumento de temperatura en los materiales de su alrededor. En la Figura 7.4 se observa la distribución de temperaturas en el relleno en varios momentos de la simulación. En color azul se representan las temperaturas más bajas y en rojo las temperaturas máximas, a medida que pasa el tiempo el área afectada por la temperatura es mayor.

En la Figura 7.3, se puede observar la evolución de la temperatura en varios puntos del relleno. En todos los puntos aumenta la temperatura a medida que transcurre la simulación. En un principio aumenta muy rápidamente debido a la introducción repentina de los flujos de calor, luego la temperatura sigue aumentando, pero más lentamente.

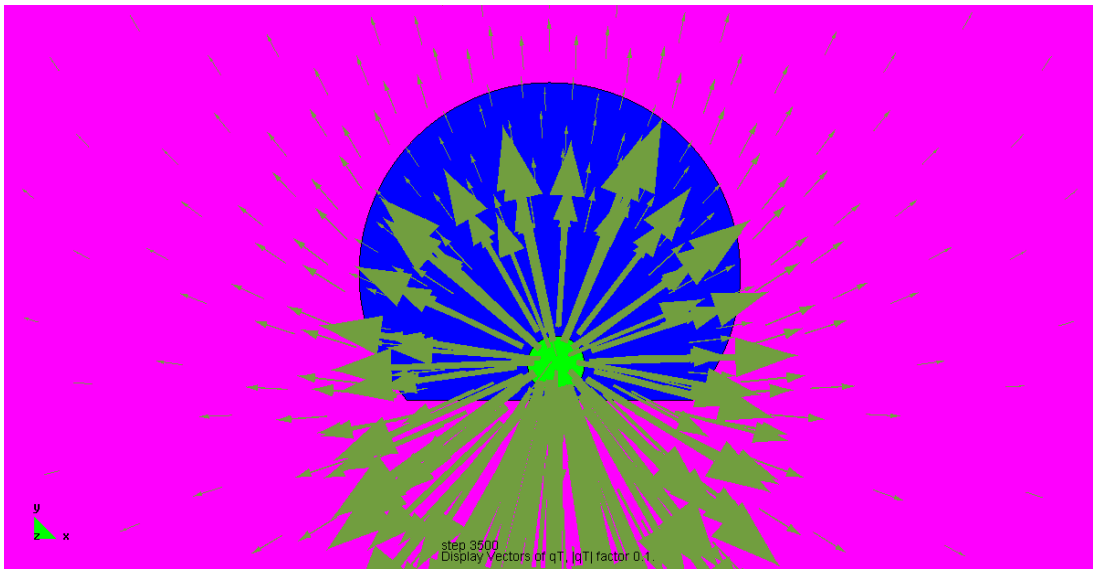

Figura 7.2 Vectores de flujos de calor generados por una potencia residual de 735W/m, el factor de escala es de 0,1.

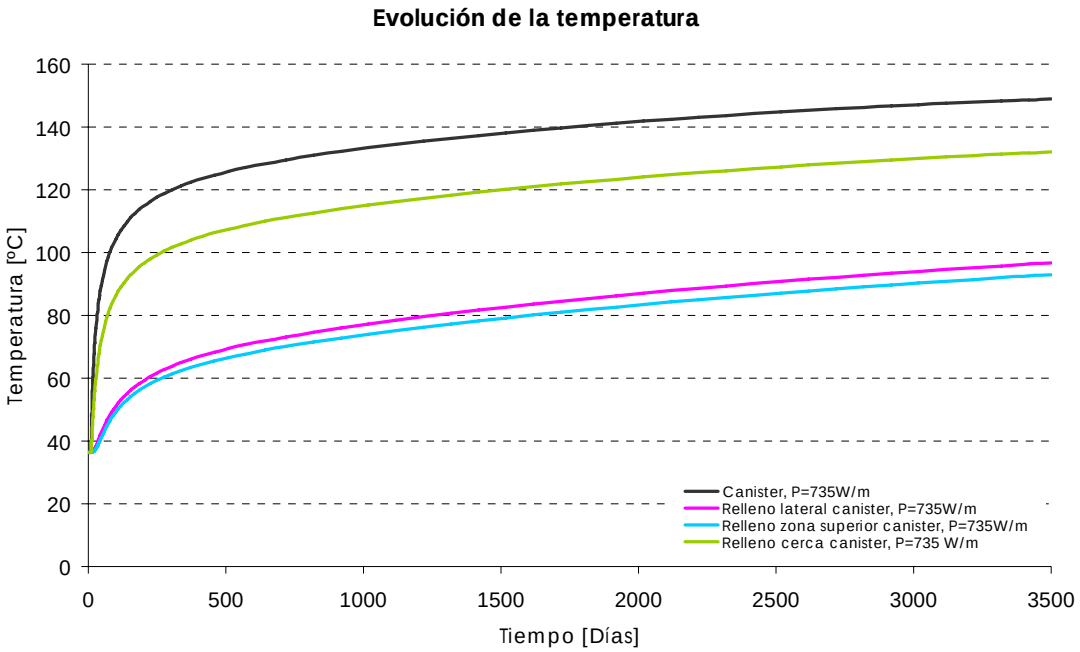

Figura 7.3 Evolución de la temperatura en varios puntos para P=735W/m.

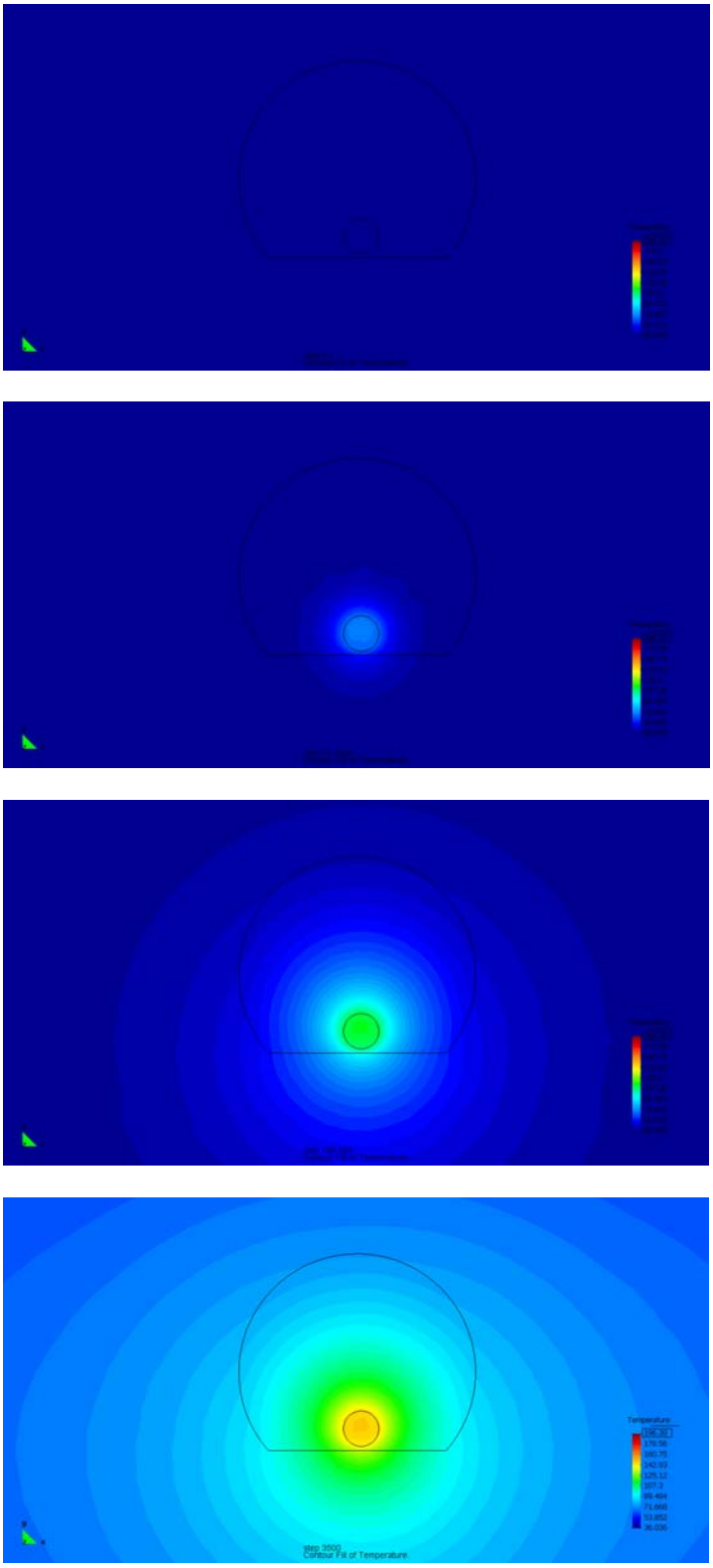

Figura 7.4 Distribución de temperaturas para P=735W/m pasados 0, 22, 185 y 3.500 días de simulación.

7.1.2. RESULTADOS MECÁNICOS

En la Figura 7.5 se analiza la variación de la porosidad en los tres puntos de medida, a grandes rasgos, se observa como en los tres puntos la porosidad se reduce.

Para los 1.000 días de simulación, en el punto de medida más cercano al canister se alcanzan los 115ºC y la porosidad ha disminuido un 5,9%, mientras que en el lateral o la zona superior del canister tan solo se han alcanzado los 77ºC y la porosidad ha disminuido un 3,7%.

En la situación final, pasados 3.500 días, la temperatura en el canister es de 149ºC. En este momento se alcanzan los valores mínimos de porosidad: En la zona más cercana al calentador el valor de la porosidad es de 0,23 (ha disminuido un 23,4%). Las zonas más alejadas del canister presentan una porosidad de 0,25 habiendo descendido como máximo un 16%, ver Figura 7.5.

En la Figura 7.6 se puede ver de una manera más clara y cualitativa la evolución de la porosidad en el relleno en varios momentos de la simulación, las cuatro gráficas presentan la misma escala.

La porosidad del relleno disminuye a medida que pasa el tiempo, las zonas más cercanas al calentador son las primeras en variar su porosidad. Una vez pasado el ecuador de la simulación, todo el relleno ve reducida su porosidad.

Esta tendencia de descenso generalizado de la porosidad es debida a que el relleno y el macizo encajante se calientan, y se acelera la progresiva convergencia de la galería. El relleno se compacta y se reduce su porosidad.

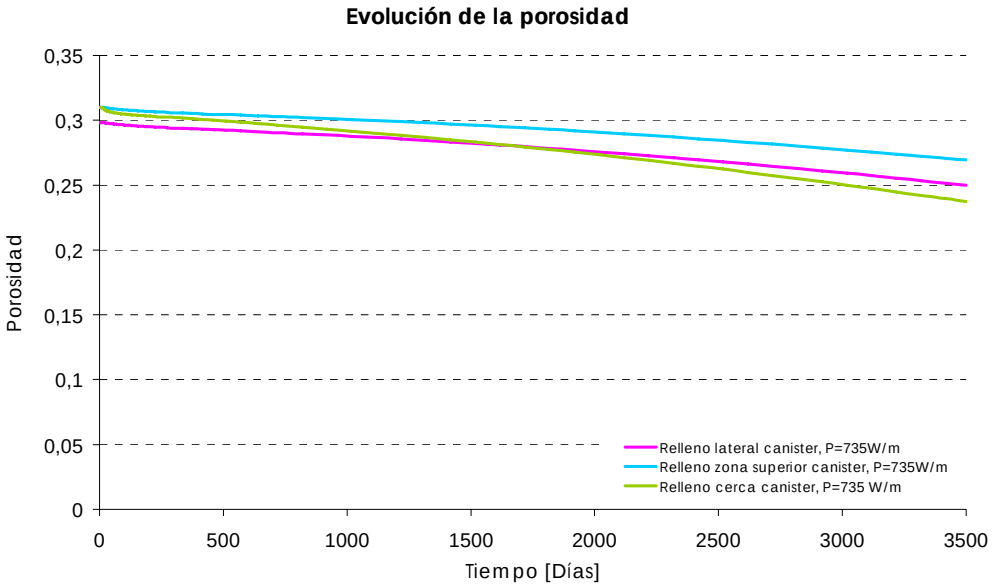

Figura 7.5 Evolución de la porosidad en los puntos de medida del relleno durante el tiempo de simulación, para 735W/m.

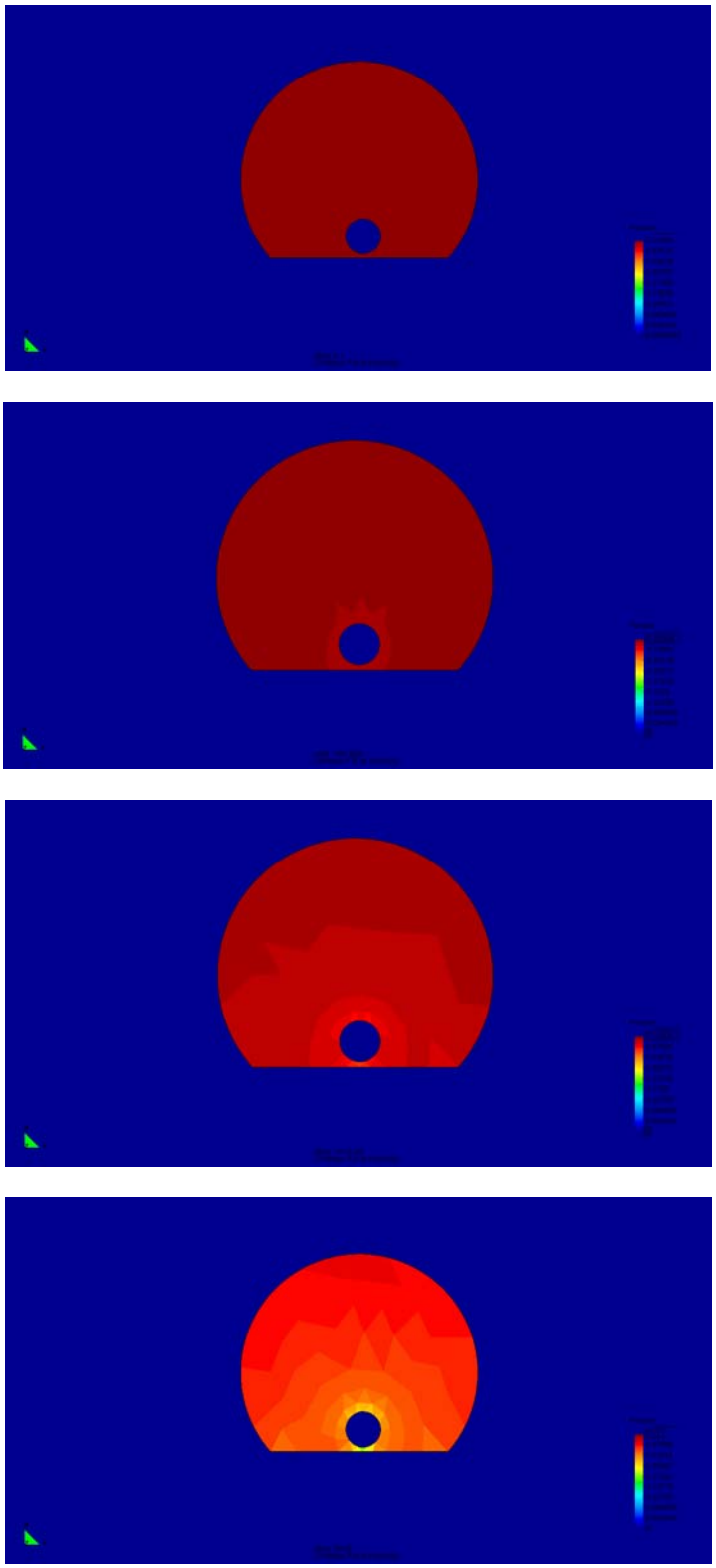

Figura 7.6 Variación de la porosidad en el relleno para P=735W/m pasados 0, 140, 1.400 y 3.500 días.

El descenso de la porosidad en el relleno afecta a otras propiedades de la roca que dependen de esta, como por ejemplo la conductividad térmica (λ_{dry}), que se expresa de la siguiente manera:

$$\lambda_{dry} = \lambda_s^{(1-\phi)} \cdot \lambda_g^{\phi}; \quad \text{por lo tanto: } \lambda_{dry} = f(\phi) \qquad (7.1) \text{ y } (7.2)$$

En la Figura 7.7 se muestra como la conductividad térmica aumenta a medida que pasa el tiempo de simulación. Los puntos en que más varía la conductividad son los más cercanos al canister, ya que son las zonas donde más se reduce la porosidad.

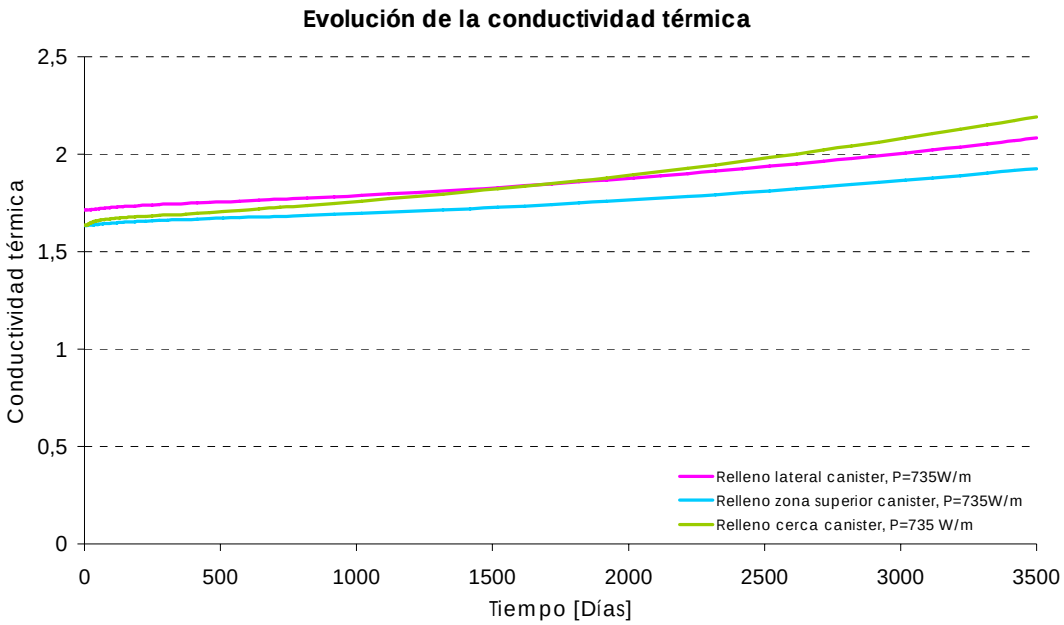

Figura 7.7 Evolución de la conductividad térmica del relleno para P=735W/m.

Con la Figura 7.8 se quiere hacer énfasis en que la disminución de la porosidad tiene una influencia directa en la conductividad térmica. A medida que la porosidad disminuye la conductividad aumenta de la misma manera. Este comportamiento podría explicar porque los flujos son mayores en el macizo rocoso. Al ser un material mucho más compacto y menos poroso que el relleno tiene una conductividad térmica mayor.

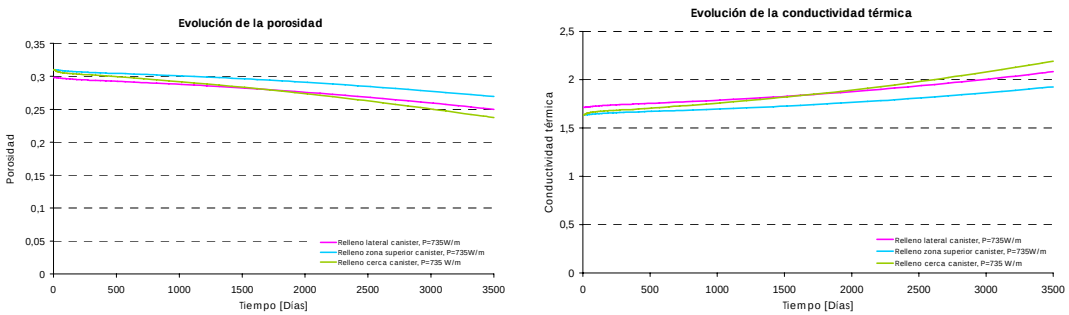

Figura 7.8 Evolución de la porosidad y de la conductividad térmica en el relleno para P=735W/m.

Los desplazamientos aumentan y se aceleran a medida que aumenta la temperatura, los puntos más alejados del canister se deforman más rápido que los más cercanos. Esto se debe a que los puntos más alejados, tienen debajo un grosor de relleno considerable, muy afectado por la temperatura y por lo tanto blando y deformable. En cambio en el punto de medida más cercano al calentador se observa como los desplazamientos son muy pequeños, esto se debe a que el canister no se deforma y en consecuencia ese punto tampoco, ver Figura 7.9.

Los desplazamientos máximos se encuentran pasados los 3.500 días de simulación en los laterales de la galería, alcanzando valores de 0,17m. En las zonas más cercanas al calentador se registran menores desplazamientos, del orden de 0,097m y 0,078m.

La convergencia natural del macizo rocoso se ve afectada por el aumento de temperatura, ya que la sal es un material altamente viscoso y fluye fácilmente bajo un incremento de temperatura. La Figura 7.10 muestra la distribución de los desplazamientos en el relleno en varios momentos de la simulación, se observa como a medida que pasa el tiempo, el relleno y el macizo se calientan y las convergencias se aceleran.

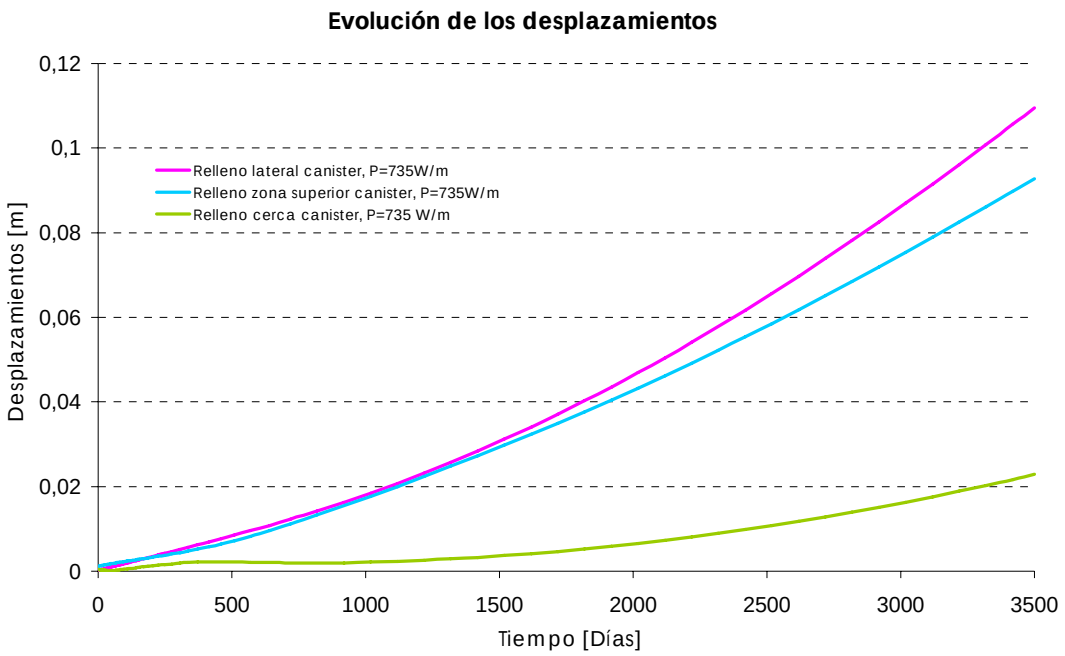

Figura 7.9 Evolución de los desplazamientos en varios puntos del relleno para P=735W/m.

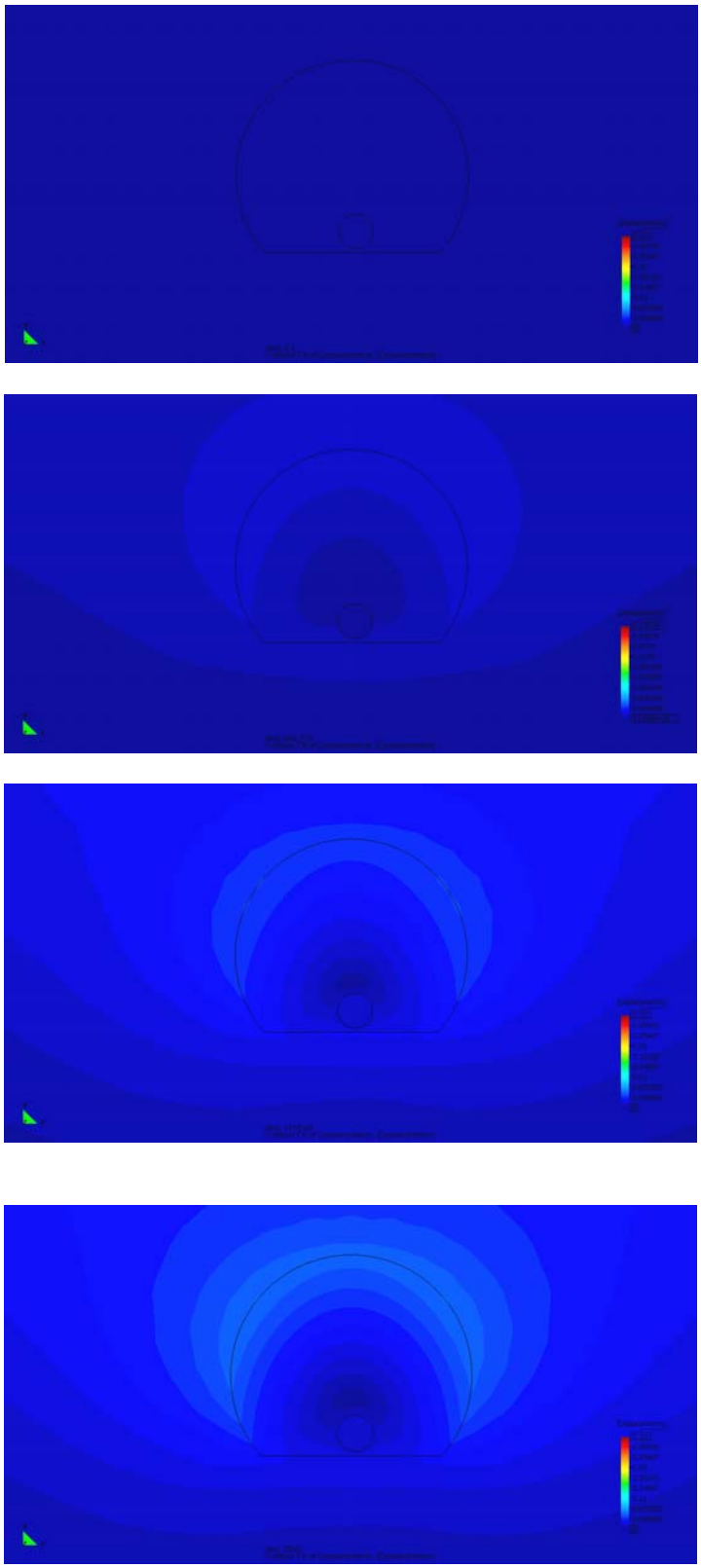

Figura 7.10 Distribución de desplazamientos en el relleno para P=735W/m, pasados 0, 300, 1.400 y 3.500 días de simulación.

En líneas generales las tensiones son mayores en la roca salina que en el relleno, esto es debido a que el relleno es bastante más blando y mucho más poroso que el macizo rocoso.

Las tensiones en el macizo son del orden de ocho veces más grandes que en el relleno, ver Figura 7.13. En la Figura 7.11 se ve claramente como las flechas, que representan las tensiones, son mucho más grandes en el macizo rocoso que en el relleno.

Se puede observar como a medida que pasa el tiempo, las tensiones en el relleno aumentan. Hasta los 750 días aproximadamente este aumento es muy rápido (se pasa de 0MPa a 1,75MPa). A partir de este momento las tensiones aumentan más lentamente, se podría decir que tienden a estabilizarse, ya que en 2.750 días se pasa de 1,75MPa a 2,25MPa, esto puede estar relacionado con el hecho de que la porosidad hasta ese momento se haya reducido bastante y el relleno esté más compactado y cuesta más reducir su porosidad, ver Figura 7.12.

También se puede ver el efecto del flujo de calor sobre las tensiones en la base de la galería, debido a la fluencia de la sal hay una zona del macizo rocoso que presenta menores tensiones pero muy concentradas, ver Figura 7.13.

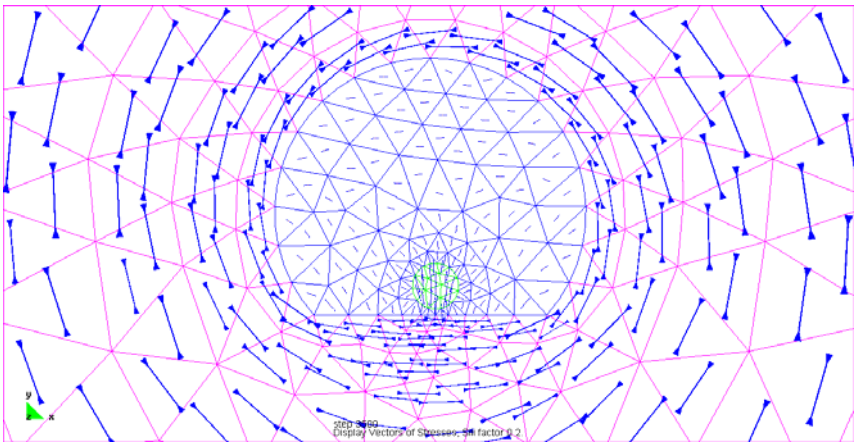

Figura 7.11 Distribución de vectores de tensiones pasados 3.500 días para P=735W/m.

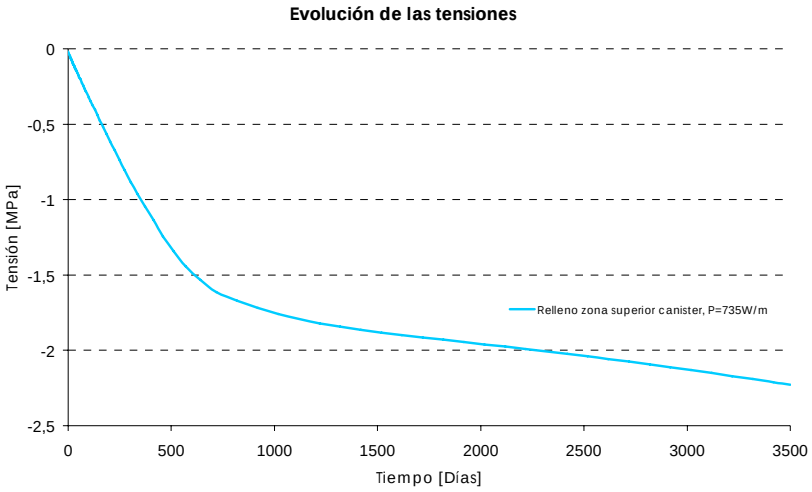

Figura 7.12 Evolución de las tensiones en la zona superior del canister para P=735W/m.

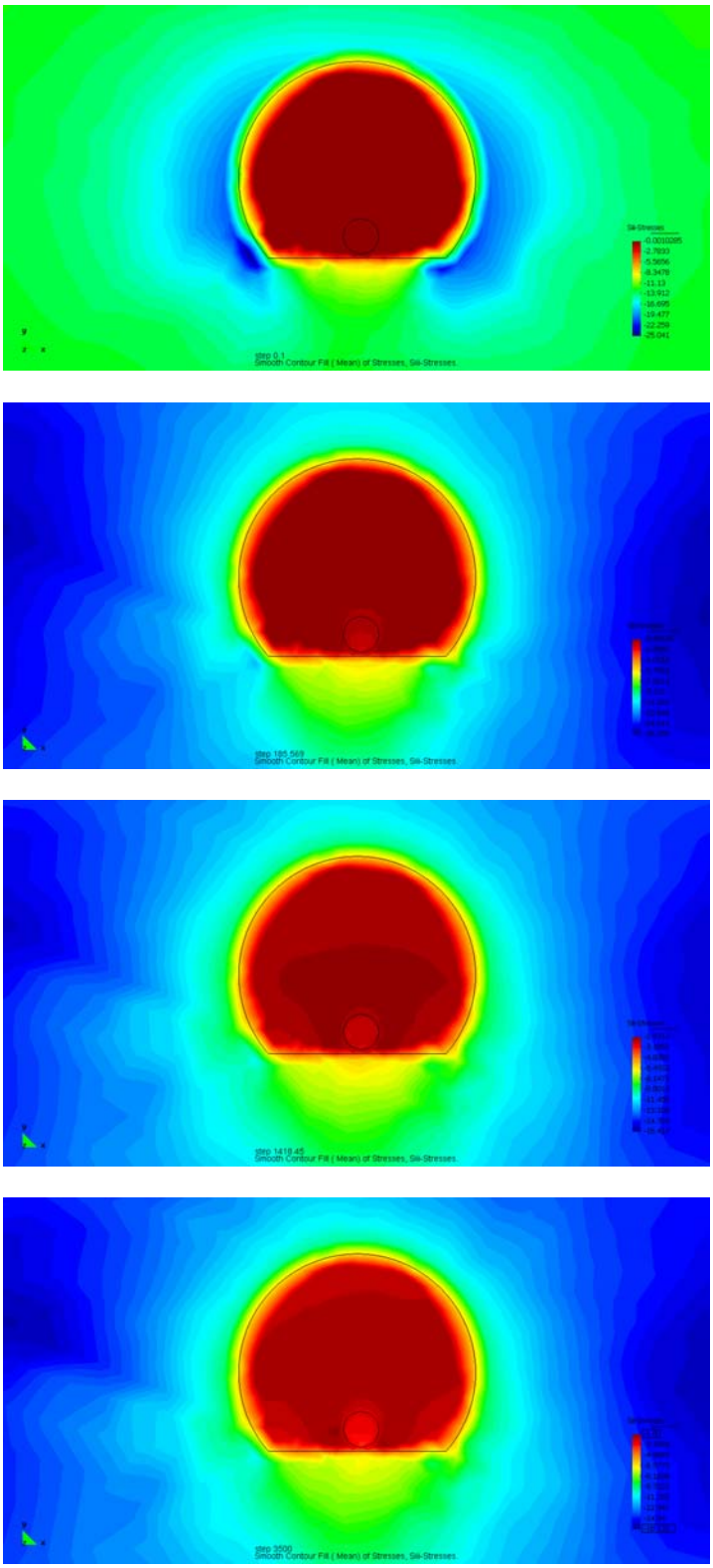

Figura 7.13 Distribución de tensiones en el relleno pasados 0, 185, 1.400 y 3.500 días, P=735W/m.

7.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Con el fin de analizar el comportamiento del modelo frente a diferentes variaciones de temperatura se han considerados cuatro flujos de calor distintos: 140W/m, 368W/m, 735W/m y 1.085W/m, estas son las potencias residuales que emite el canister de manera constante desde el décimo día de simulación hasta el final del proceso.

Al final de la simulación las temperaturas alcanzadas por el calentador van de los 58ºC, para una potencia de 140W/m, hasta los 195ºC, para 1.085W/m. En la Figura 7.14 se relaciona la potencia con la temperatura máxima alcanzada en el canister, se puede ver como la desviación respecto a una tendencia lineal se debe a la dependencia de la conductividad térmica de la porosidad y temperatura. A grandes rasgos se observa como a medida que aumenta la potencia, aumenta la temperatura que se alcanza en el calentador.

El incremento de temperatura debido al flujo de calor emitido por el canister tiene gran influencia en la porosidad. La gráfica porosidad final – potencia (Figura 7.15), muestra como la porosidad se desvía más de una tendencia lineal con la potencia, ya que a medida que aumenta la potencia, la porosidad diminuye más rápidamente por efecto de la temperatura. El aumento de temperatura acelera la fluencia de la sal.

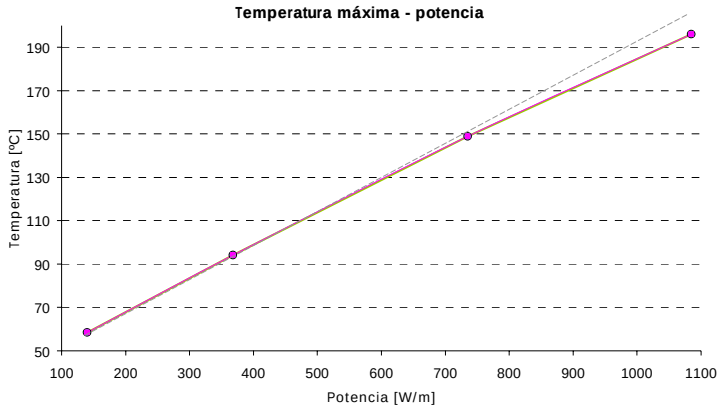

Figura 7.14 Correlación entre la temperatura máxima en el canister y la potencia residual.

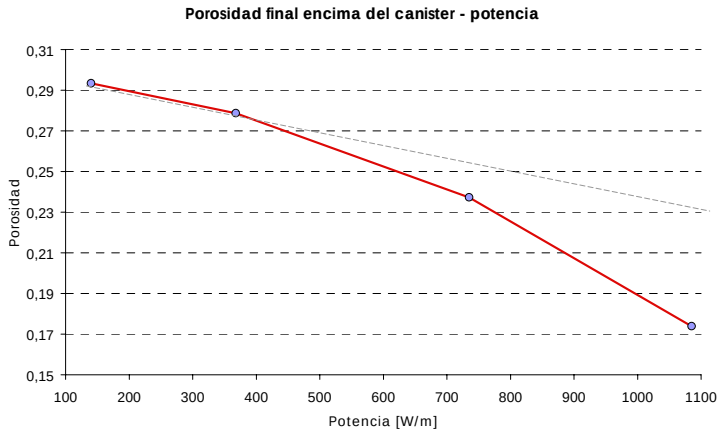

Figura 7.15 Correlación entre la porosidad final encima del canister y la potencia introducida.

A continuación se compara el comportamiento del modelo para diferentes potencias residuales: 1.085W/m, 735W/m, 368W/m y 140W/m.

7.2.1. RESULTADOS TÉRMICOS

La Figura 7.17, nos da una idea de los flujos de calor emitidos por el canister para las cuatro potencias consideradas. Todas las figuras tienen el mismo factor de escala para poder hacer una comparación cualitativa.

Los vectores que simbolizan los flujos son mayores a medida que aumenta la potencia residual, en el caso en que la potencia sea de 140W/m los vectores son muy pequeñas, en cambio en el caso en que la potencia sea de 1.085W/m las flechas son mucho más grandes, lo que implica flujos de calor mayores. Como se ha comentado en el análisis del caso base, los flujos de calor son mayores hacia las zonas del macizo rocoso, ya que es menos poroso y más conductivo.

En la Figura 7.18 se observa la distribución de temperaturas en el relleno, en los cuatro casos, todo el relleno ve aumentada su temperatura.

Para una potencia de 140W/m el canister alcanza una temperatura final de 48ºC, para 368W/m se alcanzan los 98ºC y para 1.085W/m los 196ºC, ver Figura 7.16.

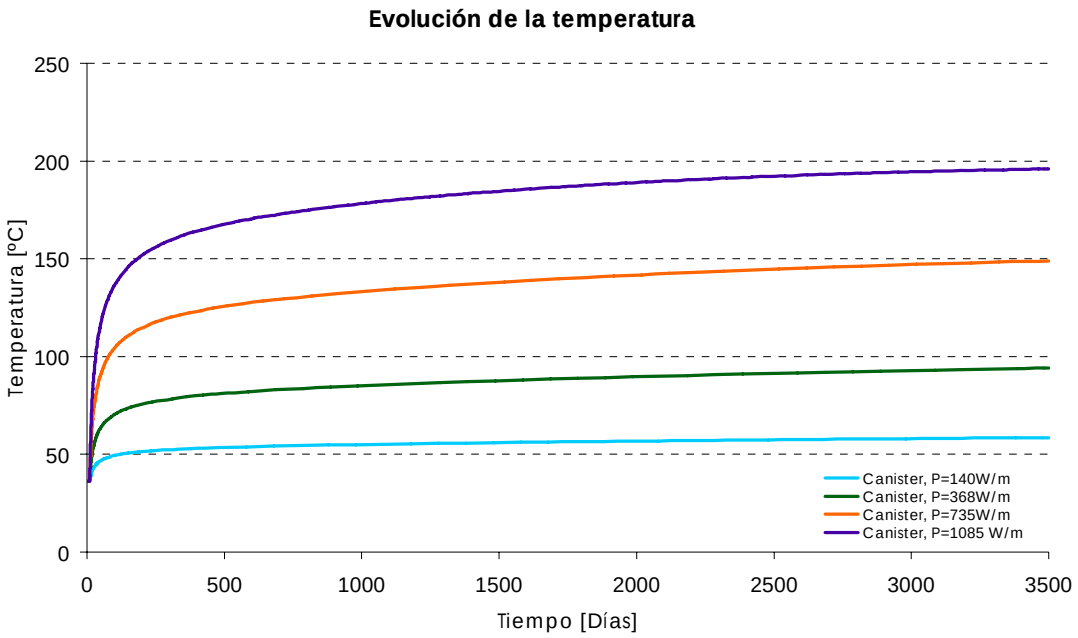

Figura 7.16 Evolución de la temperatura en el canister para potencias residuales de 140, 368, 735 y 1.085W/m.

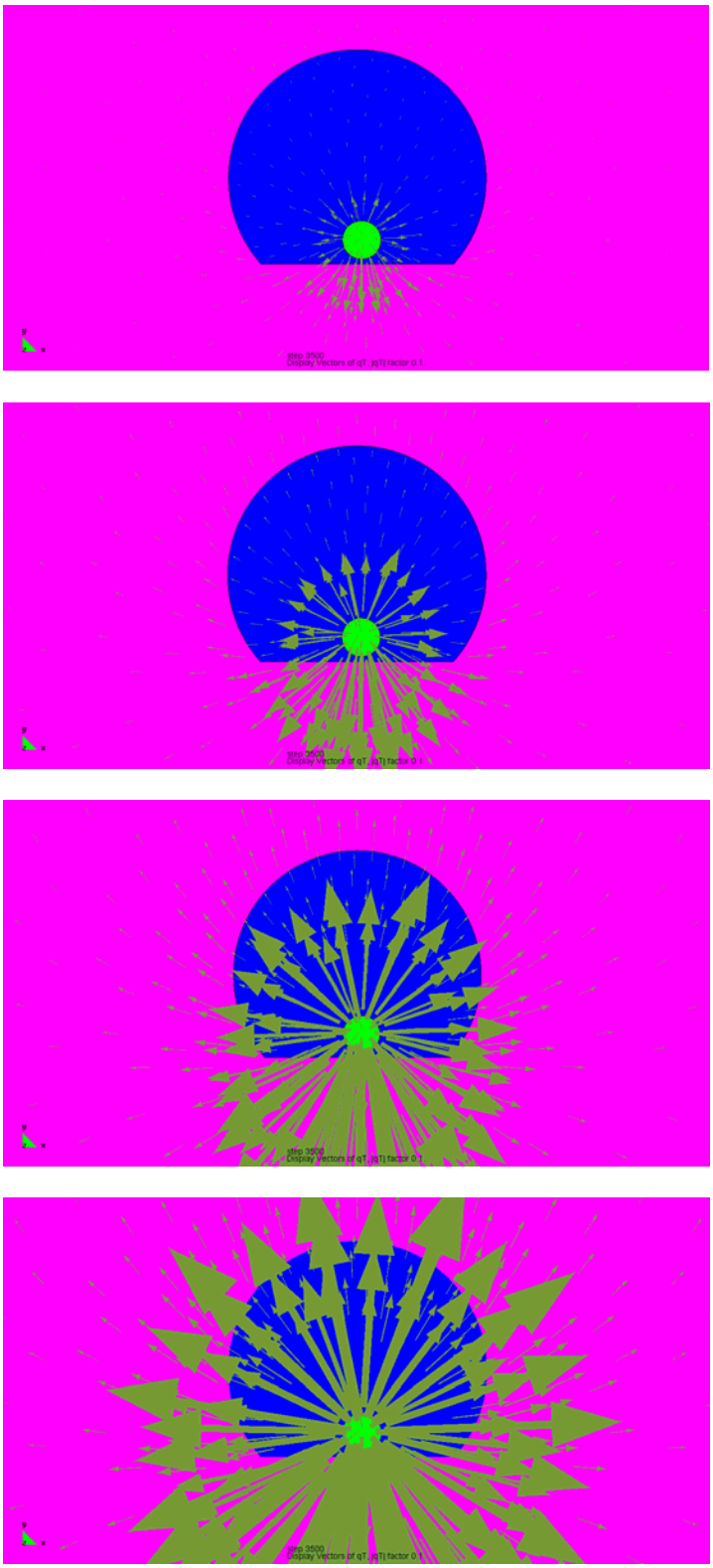

Figura 7.17 Representación mediante vectores de los flujos de calor producidos en el modelo para P=140, 368, 735 y 1.085W/m.

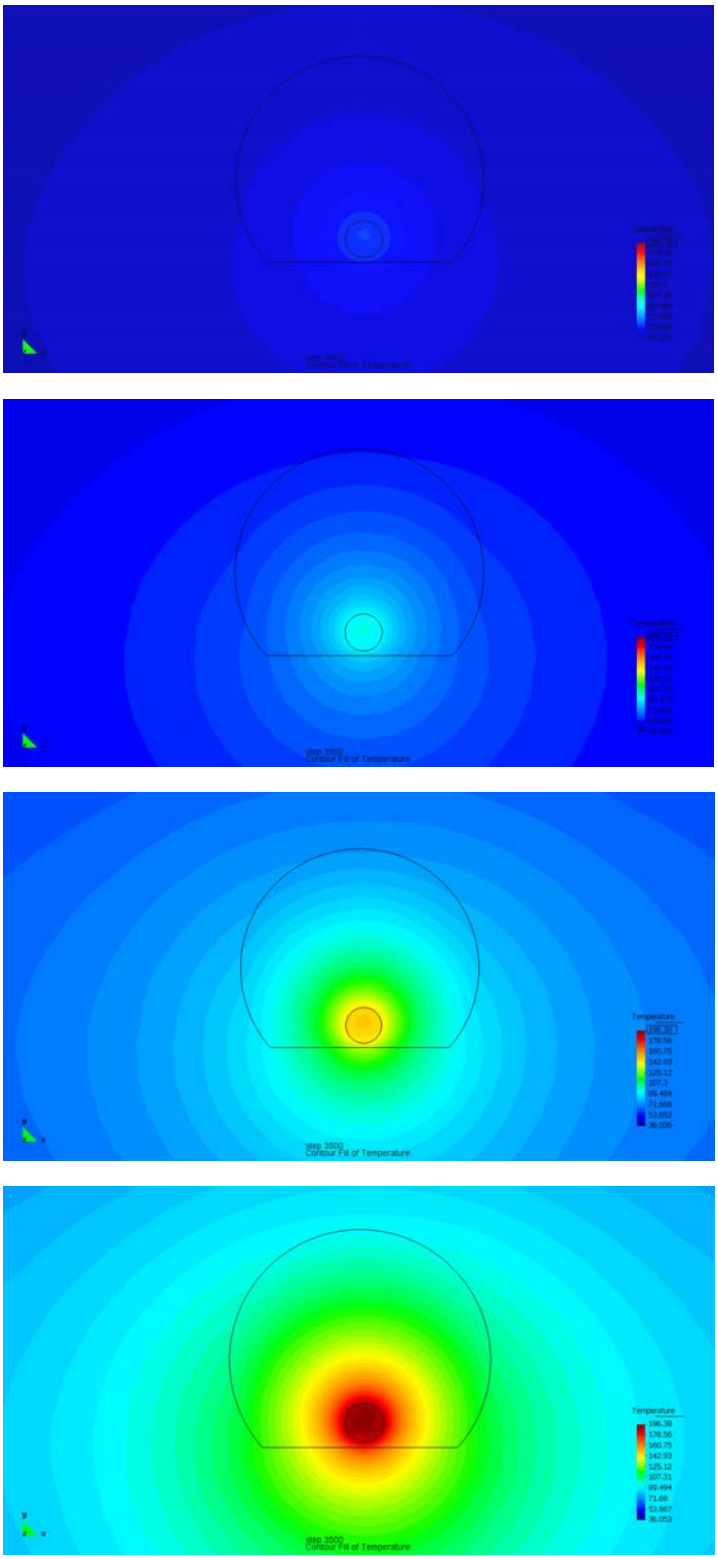

Figura 7.18 Distribución de temperaturas para P=140, 368, 735 y 1.085W/m a los 3.500 días de simulación.

7.2.2. RESULTADOS MECÁNICOS

La porosidad disminuye en las zonas del relleno más cercanas al canister; En el primer caso (potencia 140W/m), pasados los 3.500 días de simulación, la porosidad se reduce un 5,3% ha pasado de 0,31 a 0,293 (en el punto de medida más cercano al canister), es una variación muy pequeña.

Como se puede comprobar en la Figura 7.19, para una potencia residual de 140W/m la evolución de la porosidad a lo largo del tiempo es casi horizontal. Además la zona en la que se reduce la porosidad del relleno es muy pequeña, y se centra básicamente en el contorno del canister (las partes superior e inferior que son las afectadas por los flujos de calor más grandes) ver Figura 7.20.

En el caso en que la potencia introducida es de 368W/m se observa como la zona en que ha variado la porosidad es mayor que en el caso anterior, ningún punto del relleno presenta una porosidad superior a 0,28, se sigue observando como las zonas más cercanas al calentador son en las que más se reduce la porosidad. En el punto de medida considerado anteriormente la porosidad ha descendido un 10,12%, habiendo pasado de un valor 0,31 a 0,278, ver Figura 7.20.

Para 1.085W/m de potencia, la porosidad en todo el relleno se ve reducida por efecto de un mayor aumento de la temperatura que acelera la fluencia de la sal y por lo tanto las convergencias del macizo. En este caso ningún punto presenta una porosidad superior a 0,25, ver Figura 7.20. En el punto de medida considerado la porosidad se ha reducido un 44% ahora su valor es de 0,17.

En la Figura 7.19 se observa como a medida que aumentan los flujos de calor emitidos por el canister se producen mayores variaciones de la porosidad en el relleno. En general, cuanto mayor es la potencia suministrada más rápido se reduce la porosidad.

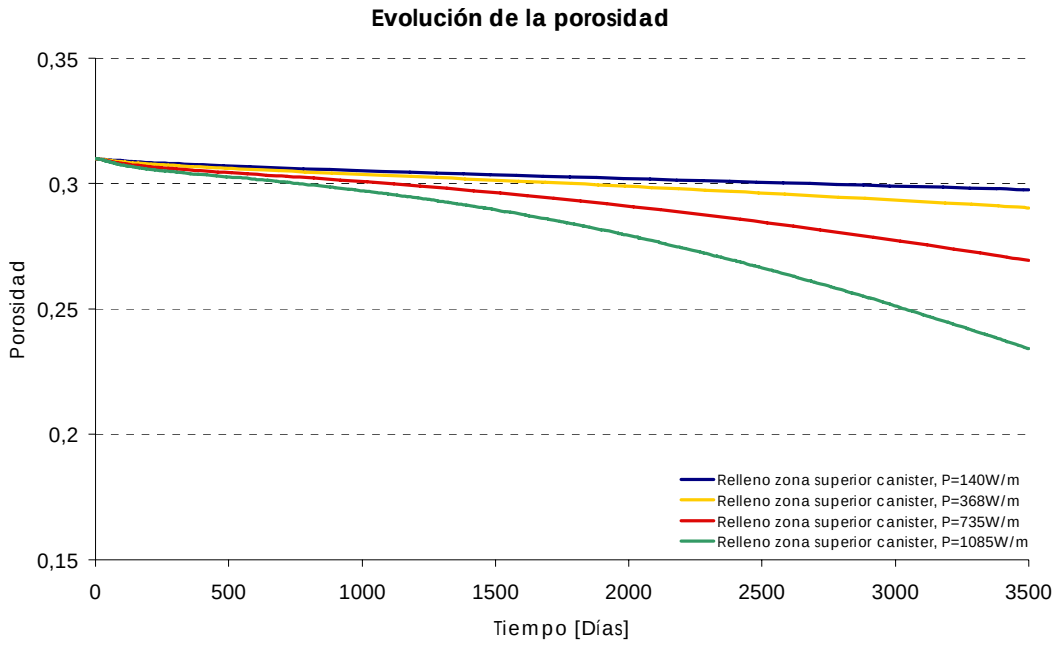

Figura 7.19 Evolución de la porosidad en el relleno para diferentes potencias residuales.

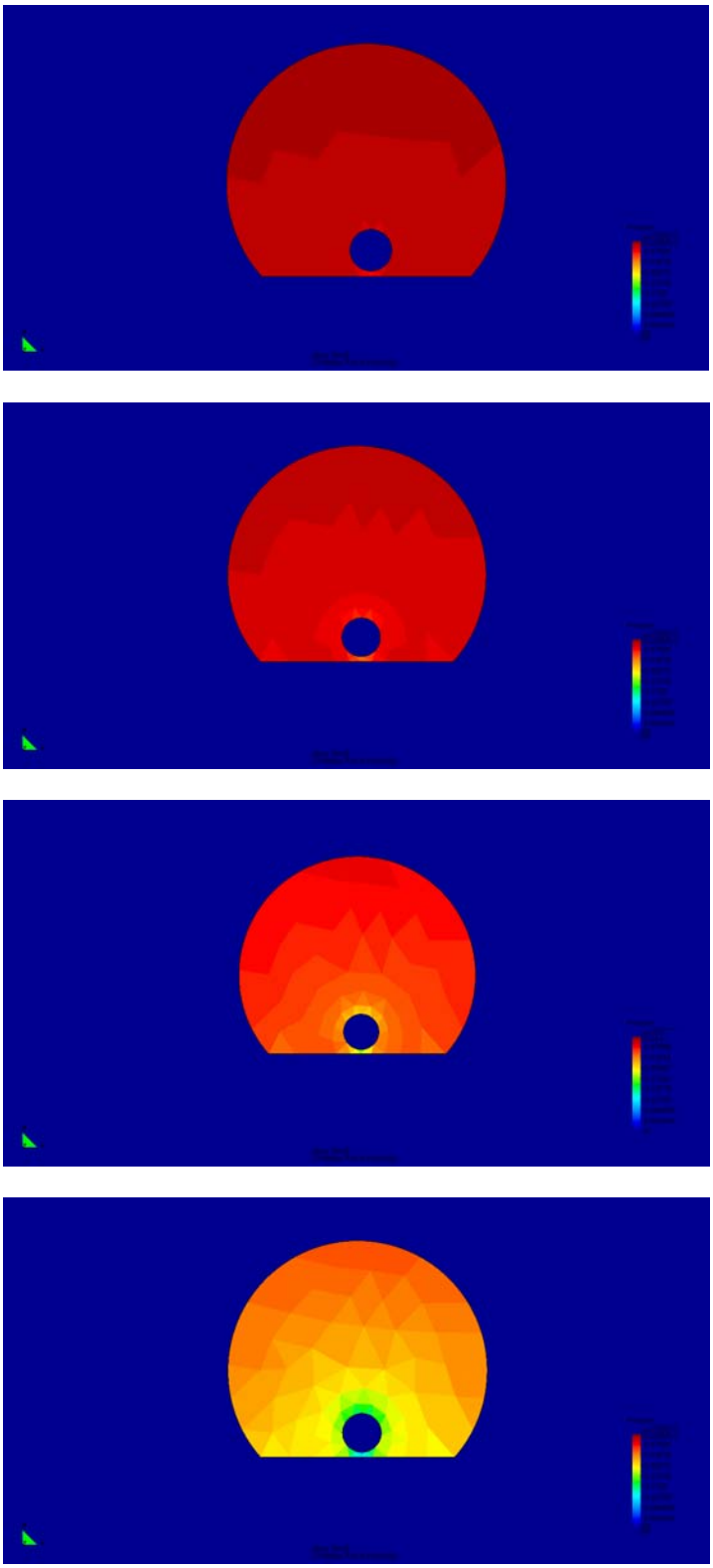

Figura 7.20 Distribución de la porosidad en el relleno para P=140, 368, 735 y 1.085W/m y 3.500 días de simulación.

En las siguientes líneas se analiza la evolución de los desplazamientos en el punto de medida, situado en la zona superior del calentador.

Los deformaciones del relleno hasta los 1.000 días de simulación son muy parecidos para las cuatro potencias, pero a partir de este momento se puede apreciar un cambio de comportamiento: Para mayores potencias se producen mayores desplazamientos (ver Figura 7.21). El desplazamiento máximo es 0,062m para una potencia de 1.085W/m y el mínimo es de 0,0055m para 140W/m.

En la Figura 7.21 se puede observar como los desplazamientos para las dos potencias más pequeñas son muy parecidos, ya que las temperaturas alcanzadas por el relleno no son demasiado altas y no ha acelerado la convergencia de la roca. En cambio para las potencias más grandes la temperatura ha afectado al relleno y a gran parte del macizo rocoso, favoreciendo que se aceleren las deformaciones en el macizo rocoso y en el relleno.

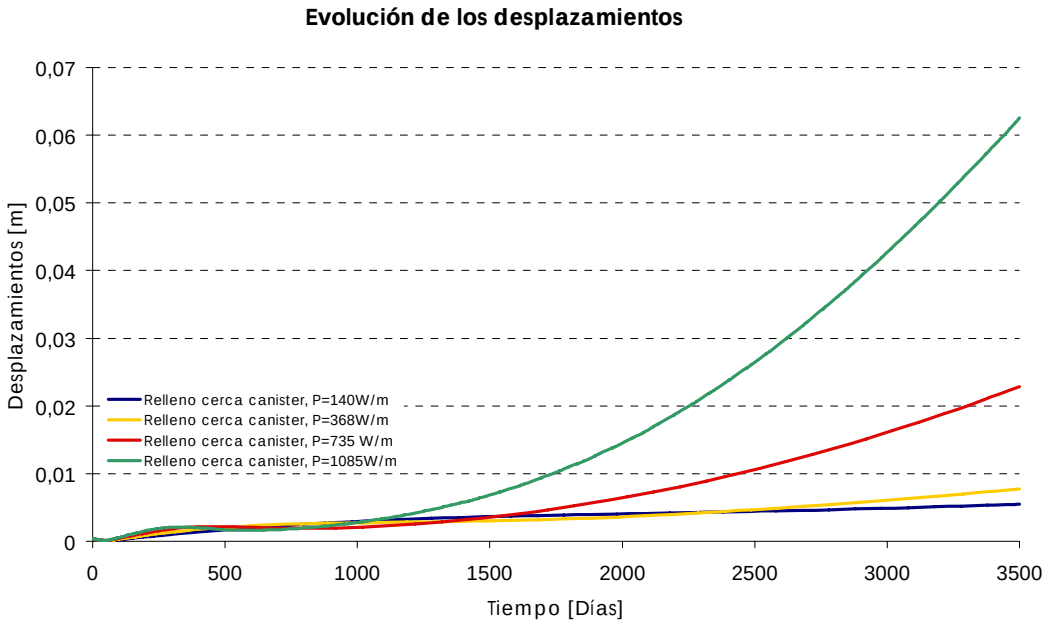

Figura 7.21 Evolución de los desplazamientos en la zona cercana al canister para las cuatro potencias consideradas.

En la Figura 7.22 se observa la distribución de los desplazamientos al final de la simulación para las cuatro potencias. La zona de máximos desplazamientos coincide en los cuatro casos: Las paredes de la galería. Por el contrario, no coinciden los valores de los desplazamientos, ya que a medida que aumenta la temperatura los desplazamientos son mayores, como se ha comentado anteriormente, incrementos de temperatura aceleran la fluencia de la sal. Esta tendencia se puede apreciar de manera muy visual: los colores azules corresponden a valores más pequeños de los desplazamientos y los rojos a los máximos. Las cuatro figuras están en la misma escala, por lo tanto se puede realizar una comparación cualitativa y visual muy rápida.

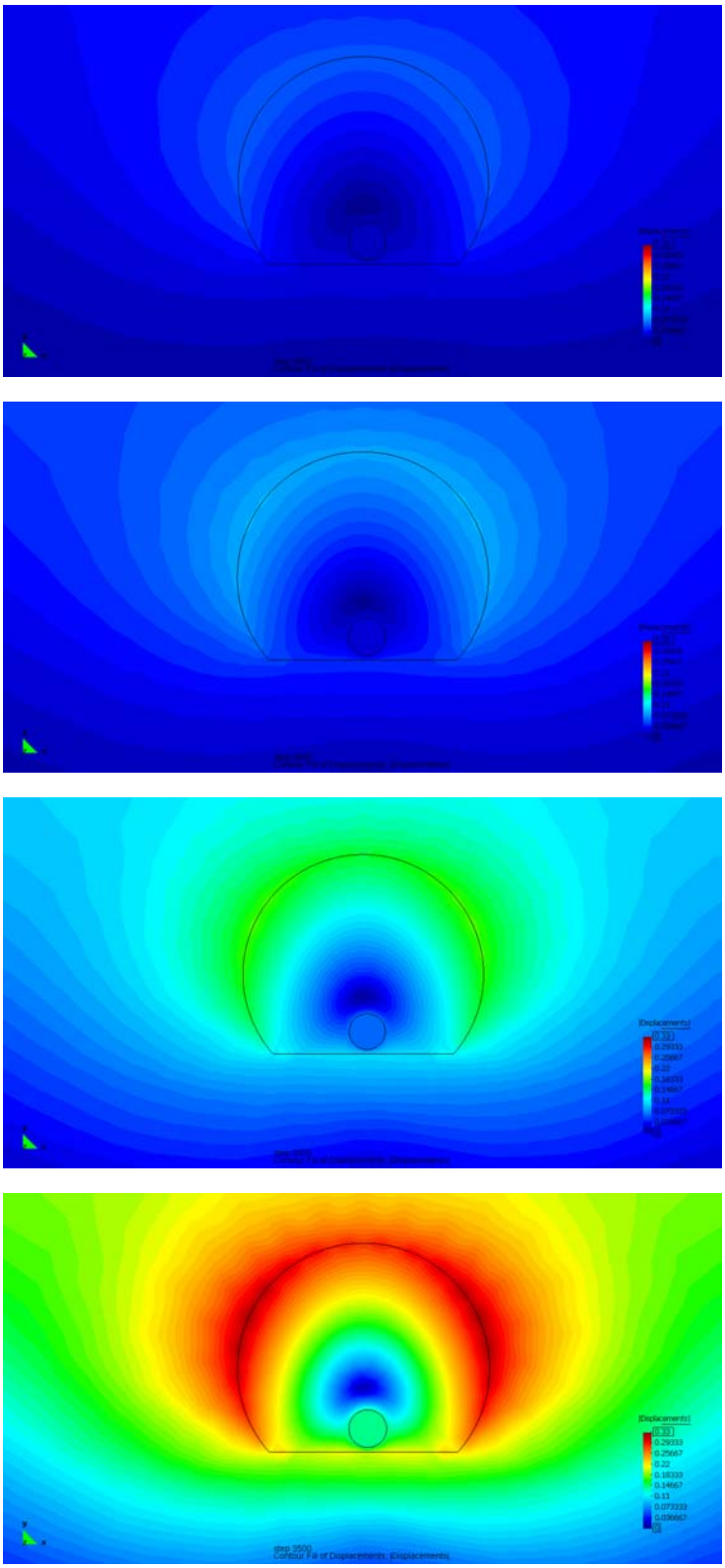

Figura 7.22 Distribución de los desplazamientos en el modelo para P=140, 368, 735 y 1.085W/m y 3.500 días.

El macizo rocoso presenta las mayores tensiones, en la zona de cambio de material, entre la roca encajante y el relleno, la variación es muy brusca, se pasa de altas tensiones entorno a -15MPa (color azul) en el macizo a valores muchísimo más pequeños (color rojo) en el relleno (-1MPa), ver Figura 7.24. A medida que aumenta la potencia, las tensiones son mayores en el relleno.

En la zona del macizo rocoso situada en la base de la galería, las tensiones disminuyen a medida que aumenta la potencia. Esta zona de acumulación de tensiones tiende a abarcar más espacio a medida que aumenta la potencia, ver Figura 7.24.

En la Figura 7.23 se ve como para las cuatro potencias la evolución de las tensiones en la zona superior de canister presenta comportamientos bien distintos: Hasta los 1.500 días, cuanto mayor es la potencia más rápido aumentan las tensiones (en valor absoluto).

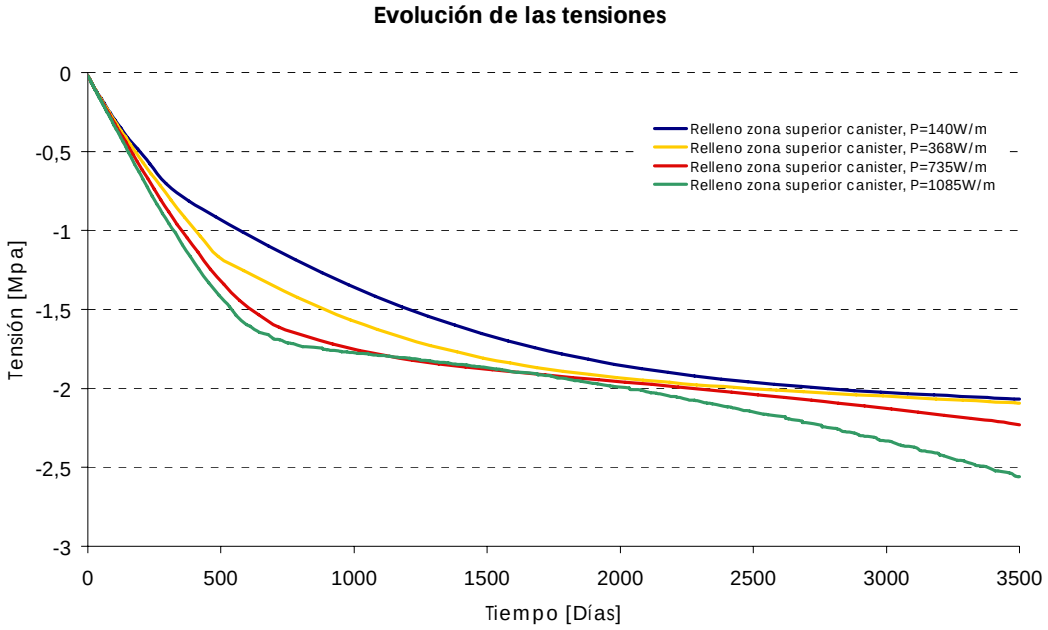

Figura 7.23 Evolución de las tensiones en la zona superior del canister.

Las tensiones para las cuatro potencias tienden a estabilizarse hacia el mismo valor: -1,7MPa o -1,8MPa entre los 1.500 – 2.000 días, independientemente de la temperatura y la porosidad alcanzada. A partir de ese momento, al aumentar la potencia residual, las tensiones siguen aumentando como consecuencia de la disminución de porosidad, para los casos de potencias más bajas las tensiones tienden a estabilizarse. La tensión máxima es de -2,7MPa (si P=1.085W/m) y la mínima es de – 2MPa (si P=140W/m).

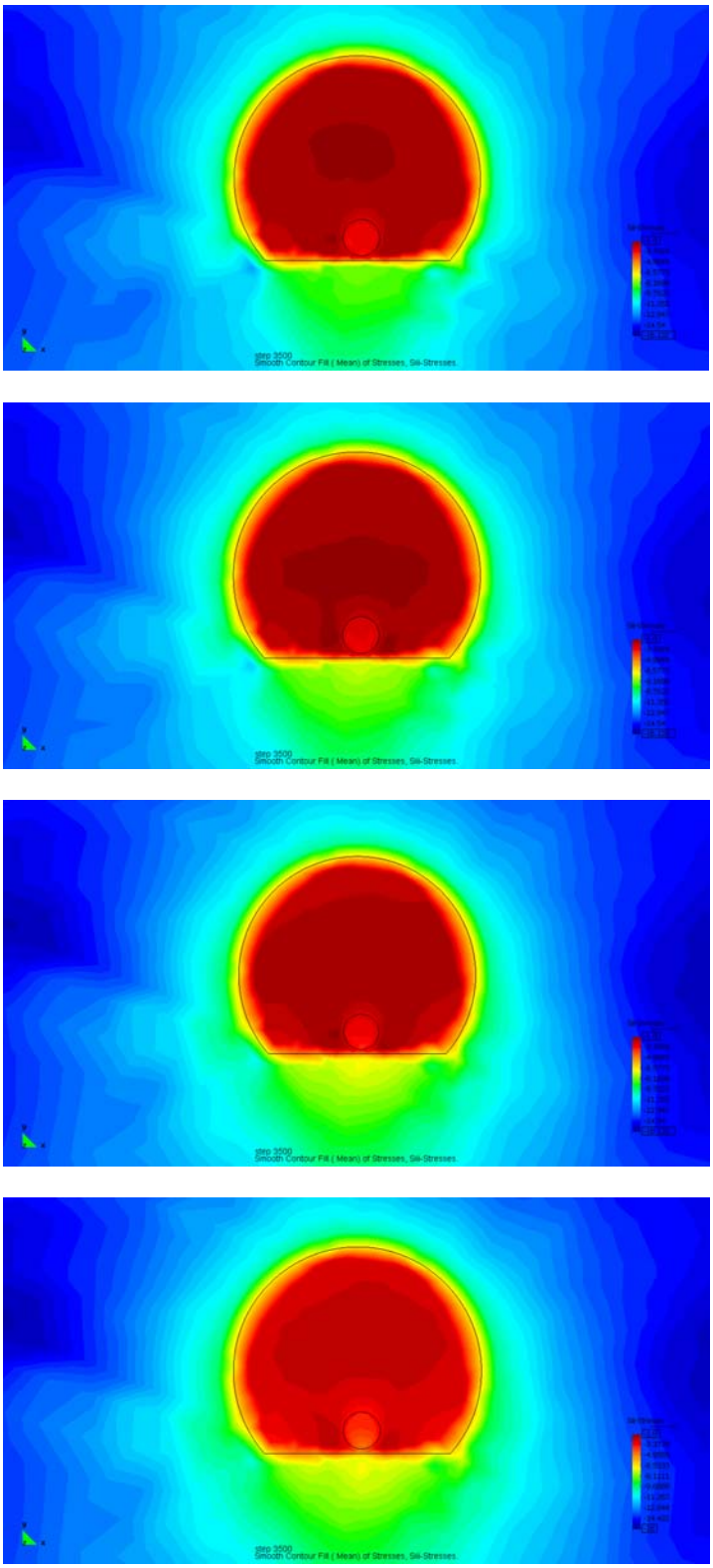

Figura 7.24 Distribución de las tensiones en el modelo para P=140, 385, 735 y 1.085W/m y 3.500 días.

8. ANÁLISIS EN AMBIENTE HÚMEDO

En este caso se analiza el comportamiento del relleno de agregados salinos porosos cuando se produce simultáneamente una hidratación del relleno debida a la presencia de agua, el calentamiento inducido por el canister y la acción de la convergencia natural de la roca.

El modelo utilizado para este caso es el mismo que se ha usado en el caso anterior, únicamente se ha implementado con los parámetros necesarios para poder simular el mecanismo de deformación FADT además del DC.

Los efectos de los procesos THM acoplados para el caso estudiado se describen brevemente a continuación, y serán analizados en profundidad en los siguientes capítulos.

A grandes rasgos se puede decir que los efectos de la variación de la temperatura producida por el calentador provocan la evaporación del agua en las zonas más cercanas al canister, secando esa zona (disminuye el grado de saturación y la presión de líquido).

El vapor de agua se mueve desde el canister a zonas más alejadas (migración del vapor), zonas más frías como las paredes de la galería (Contacto entre el relleno de sal y el macizo encajante) donde se produce la condensación del vapor. Este efecto produce un incremento local del grado de saturación.

La porosidad se reduce rápidamente en el relleno debido a la presencia de agua y a la variación de la temperatura que aceleran la convergencia de la roca. Los parámetros dependientes de la porosidad también variarán, condicionando el comportamiento del relleno.

A continuación se detallan los parámetros introducidos para la simulación del FADT:

	UNIDADES	RELLENO	MACIZO ROCOSO	CANISTER
DEFORMACIONES VISCOELÁSTICAS				
$d\theta$	-	0,5e-3	0,5e-3	-
AB	-	0,6e-12	0,6e-12	-
QB	-	0,2453e+5	0,2453e+5	-
PARÁMETROS HIDRAÚLICOS				
Permeabilidad intrínseca $k_1=k_2=k_3$	m^2	1e-12	1e-19	1e-14
CURVA RETENCIÓN				
P_0	-	0,1e-1	0,1e-1	0,1
σ_0	-	0,72e-1	0,72e-1	0,72e-1
λ	-	0,5	0,5	0,5
Sr_{min}	-	0	0	0
Sr_{max}	-	1	1	1

Tabla 8.1 Propiedades de los materiales consideradas en el modelo húmedo.

Condiciones de contorno:

Las mismas que en el caso seco, además se ha implementado para el caso húmedo:

- $P_\ell = -100MPa$ y $\gamma_\ell = 100$ en las líneas de contorno.
- Tamaño de grano 500μm.

Condiciones iniciales:

Se han considerado las mismas condiciones iniciales que en el caso seco. Además se ha implementado para el caso húmedo:

- $P_\ell = -10MPa$ en todo el dominio.
- El tiempo de modelado ha sido 3.500 días (aproximadamente 10 años).

8.1. ANÁLISIS DEL CASO BASE

En este apartado se analizaran los resultados obtenidos para la simulación del caso húmedo.

Como en el caso seco, analizado anteriormente, el proceso de simulación consta de dos etapas:

- La primera etapa dura alrededor de 10 días, se considera una presión litostática de -10MPa y no se aplica ningún tipo de calor. Se produce una relajación de las tensiones. Al estar en ambiente húmedo se ha considerado una presión de líquido de -10MPa y una γ_l=100. Tener en cuenta una presión de líquido en el dominio implica que el relleno y el macizo encante presentan un grado de saturación correspondiente al valor de la presión de líquido en la curva de retención del material.

- En la siguiente etapa se introduce el flujo de calor (cuyas unidades serán W/m de canister) que se mantendrá constante hasta alcanzar el tiempo de simulación deseado.

En ambas etapas se utiliza el modelo viscoplástico que simula las deformaciones plásticas debidas a la fluencia de la sal.

En este apartado se analizan los resultados del modelo para el caso en que la potencia residual es de 140W/m en el calentador.

El tiempo de simulación ha sido 3.500 días. La temperatura inicial en el dominio es de 36,4ºC y al final de la simulación se han alcanzado 43,7ºC en el canister. Los puntos de análisis son los mismos que los considerados para el análisis en ambiente seco, de esta manera se podrán comparar los resultados (ver Figura 7.1).

8.1.1. RESULTADOS TÉRMICOS

El flujo de calor residual emitido por el canister (140W/m) produce una variación en la temperatura del material colindante, afectando directamente al relleno y a la roca encajante.

En la Figura 8.1 se observa como los vectores de flujos de calor se distribuyen radialmente en el material cercano al canister.

En la Figura 8.2 queda bastante clara la zona de alcance de los flujos de calor y sus valores. Se puede apreciar como la distribución de flujos de calor en el dominio no es uniforme (Figura 8.2), los flujos son mayores cuando atraviesan el macizo rocoso. Claramente, en la base de la galería el área de influencia de los flujos de calor es más amplia y los valores son más altos cuando están en contacto con el macizo rocoso, que presenta una conductividad térmica mayor.

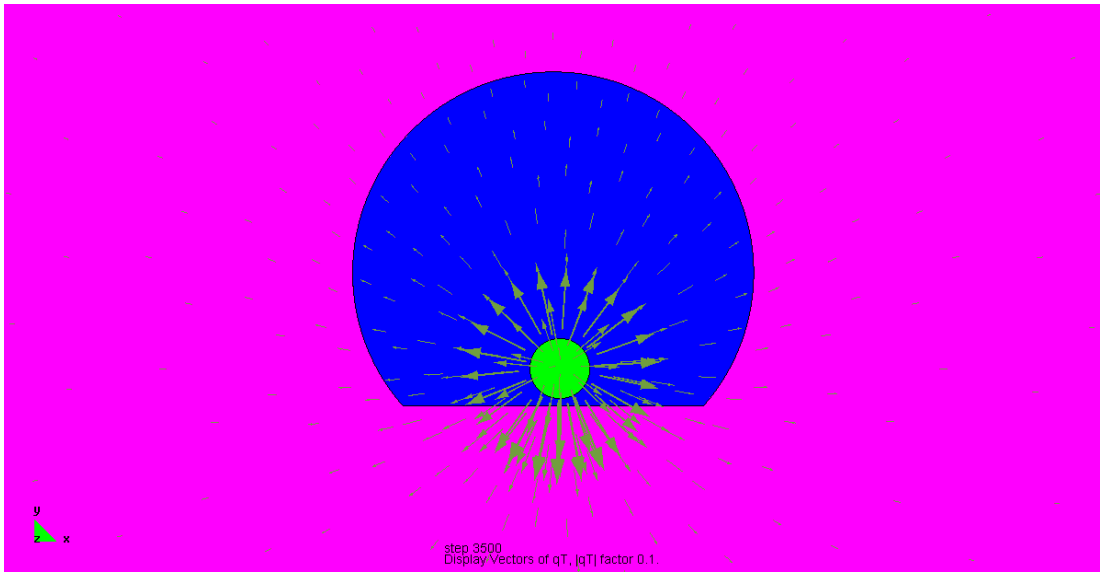

Figura 8.1 Vectores de flujos de calor para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

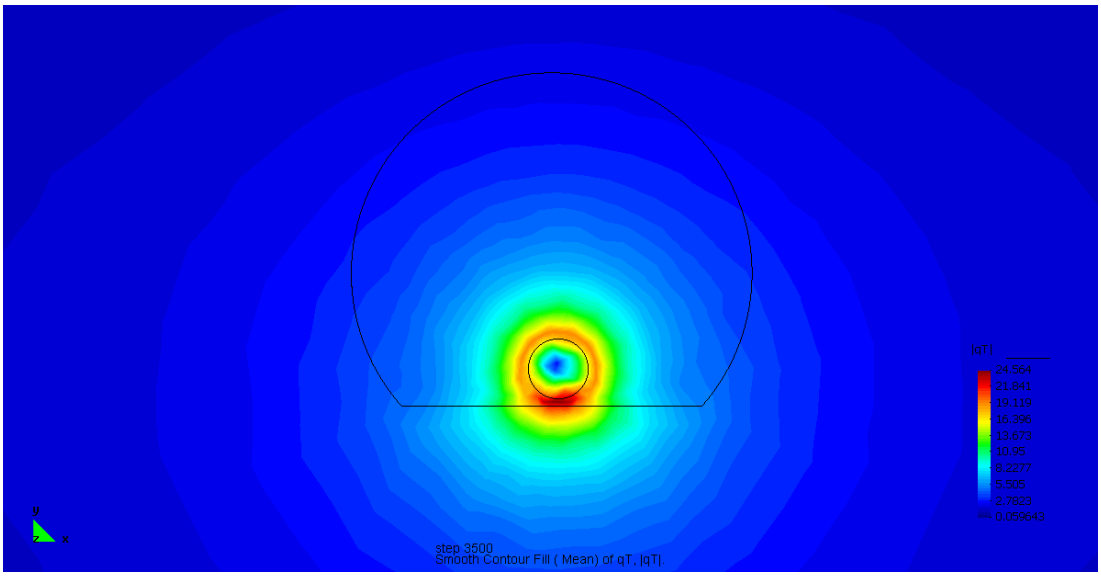

Figura 8.2 Distribución de los flujos de calor para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

La distribución de temperaturas al final de la simulación, tanto en el relleno salino como en el macizo encajante, están representadas en la Figura 8.3. La zona más caliente es el canister, que alcanza una temperatura de unos 53ºC, las temperaturas van disminuyendo a medida que se alejan del canister. En el punto de medida más cercano al calentador se alcanzan los 50ºC, mientras en los puntos de medida más alejados la temperatura es de 43,7ºC.

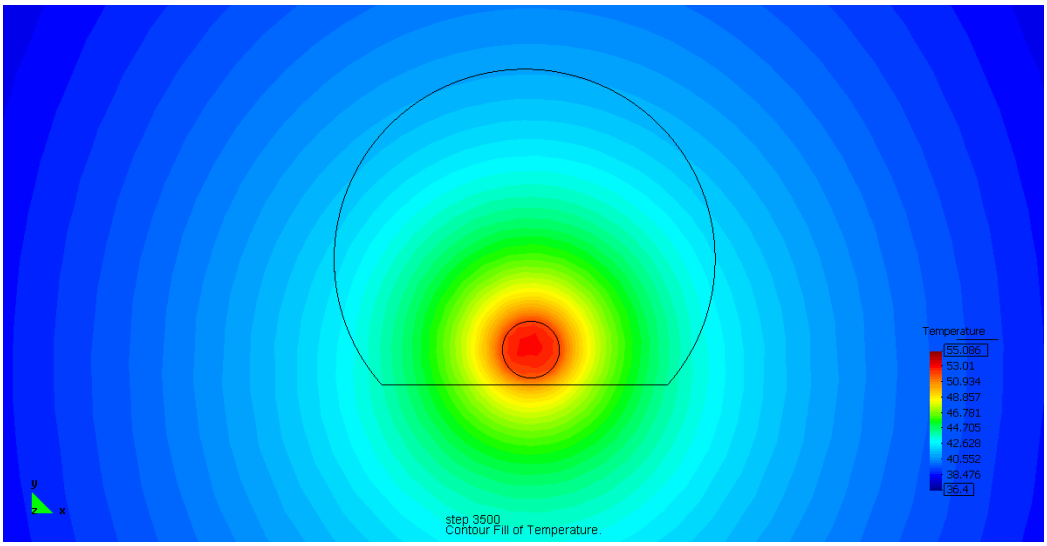

Figura 8.3 Distribución de temperaturas para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

En la Figura 8.4 se observa un fenómeno bastante curioso: En los puntos más alejados del centro de la galería la temperatura al final de la simulación coincide con la temperatura máxima, en cambio en las zonas más cercanas al calentador, y en el mismo canister, este fenómeno no se produce.

Esto es debido a dos procesos que se originan en el relleno: el más importante es la reducción de la porosidad del relleno, que provoca un aumento de su conductividad térmica y por lo tanto se favorece la disipación del calor. También se dan fenómenos de difusión del vapor: el agua se evapora en la zona más cercana al canister y se mueve (transportando calor y humedad) hacia zonas más distales y frías. Estos dos fenómenos se pueden considerar como un mecanismo de refrigeración del calentador.

Esta especie de refrigeración-disipación térmica es más acusada en el canister: a los 450 días se alcanza la temperatura máxima de 55ºC, pero a partir de ese momento la temperatura empieza a descender tendiendo a un valor de 53ºC (ver Figura 8.4). En el caso de las zonas más cercanas al canister también se produce el mismo efecto pero de menor magnitud.

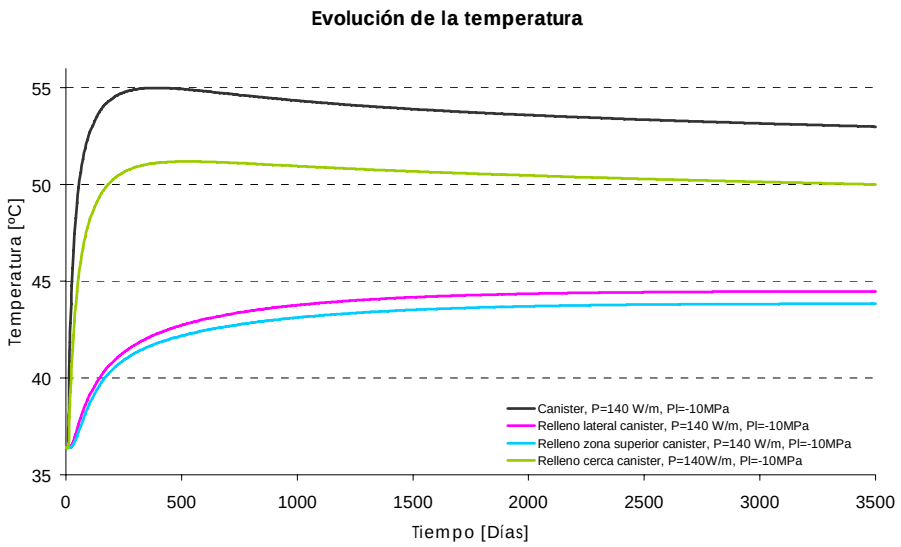

Figura 8.4 Evolución de la temperatura en el relleno para P=140W/m y Pl=-10MPa.

8.1.2. RESULTADOS HIDRÁULICOS

Las variaciones del grado de saturación para los tres puntos más representativos del relleno están representadas en la Figura 8.6. El comportamiento es muy diferente dependiendo de la situación de los puntos de medida. En la Figura 8.5 se observa como hay dos zonas bien diferenciadas: Una zona que rodea al canister donde el grado de saturación es de 0,0001 (zona muy seca) y otra que comprende las paredes y el techo de la galería (en el macizo encajante) donde los valores son cercanos a 0,1 (zona más húmeda).

En la zona más cercana al canister se ha producido un secado bastante importante del relleno, esto se debe a que el agua se ha evaporado y migrado hacia zonas más alejada. El grado de saturación en esa zona desciende muy rápidamente a partir de la introducción de calor (desde los 10 días), alcanzando un valor de 0,0001 que se mantendrá constante hasta el final de la simulación, ver Figura 8.6.

En los puntos de medida más alejados del calentador el grado de saturación aumenta muy rápido al principio esta zona está más fría y se condensa el vapor producido en las zonas más calientes. Pero llega un momento en que la variación de temperatura les afecta lo suficiente como para que éstos también empiecen a secarse y disminuya su grado de saturación.

En la Figura 8.6, el punto situado en un lateral del relleno, alcanza un grado de saturación máximo de 0,0027 pasados 350 días, no obstante a partir de entonces estas zonas también se ven muy afectadas por la temperatura y se reduce la llegada de vapor (se empiezan a secar) y el grado de saturación empieza a descender hasta que se mantiene constante entorno a 0,001.

En la Figura 8.7 se muestra en varias instantáneas la evolución del grado de saturación en el relleno: A los 200 días el calentador ha empezado a secar casi todo el relleno y hay pequeñas zonas del macizo rocoso, en los laterales de la base de la galería, donde se acumula vapor agua. Al llegar a los 900 días empiezan a desarrollarse en la zona del techo de la galería esas pequeñas zonas de acumulación de vapor, el grado de saturación alcana valores de 0,05. Al final de la simulación el calor ha secado el relleno, el grado de saturación ha descendido hasta 0,0001 mientras en el techo los valores son del orden de 0,14.

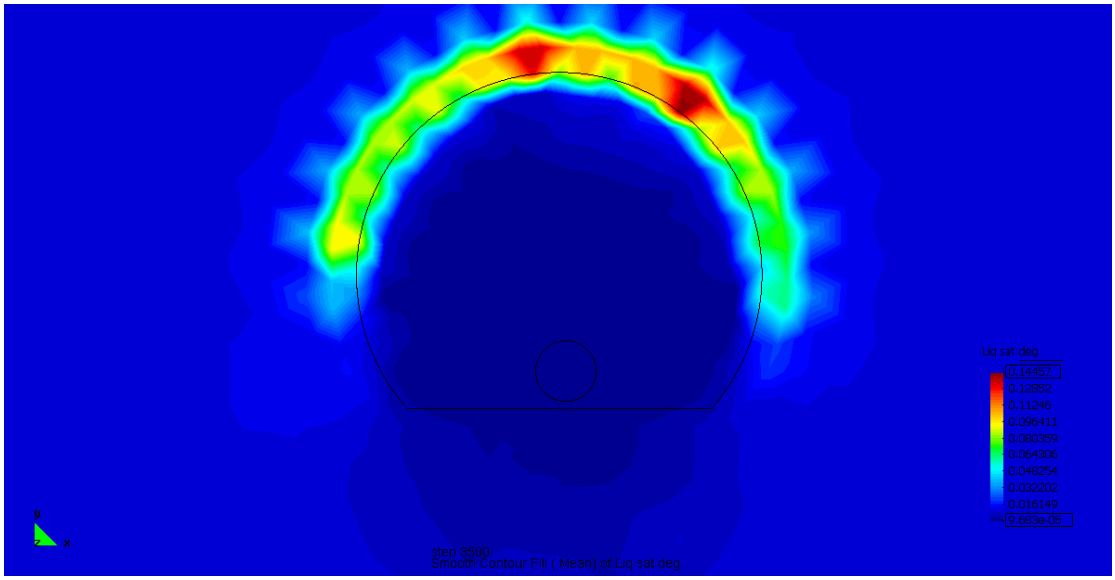

Figura 8.5 Distribución del grado de saturación en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

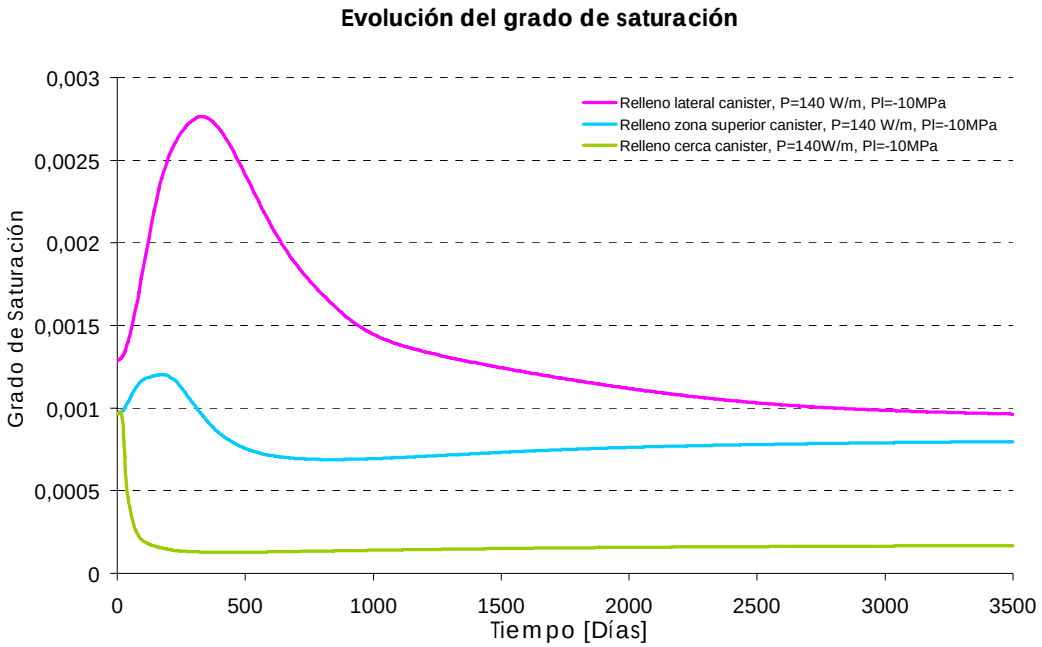

Figura 8.6 Evolución del grado de saturación en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

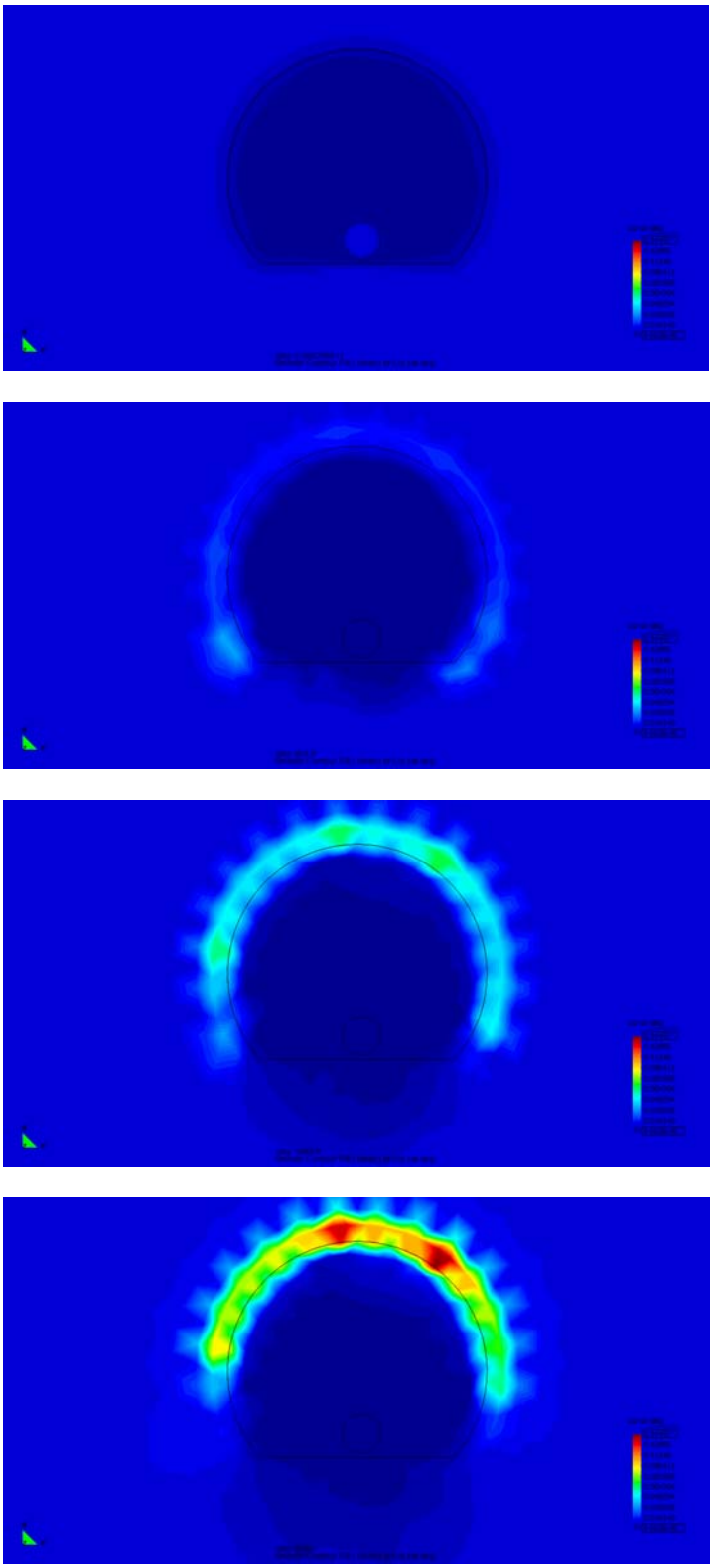

Figura 8.7 Distribución del grado de saturación en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 0, 360, 1.400 y 3.500 días.

En la Figura 8.8 y la Figura 8.9 se observa como la presión de agua presenta una evolución en el tiempo de simulación y una distribución de presiones en el dominio muy parecida a la del grado de saturación.

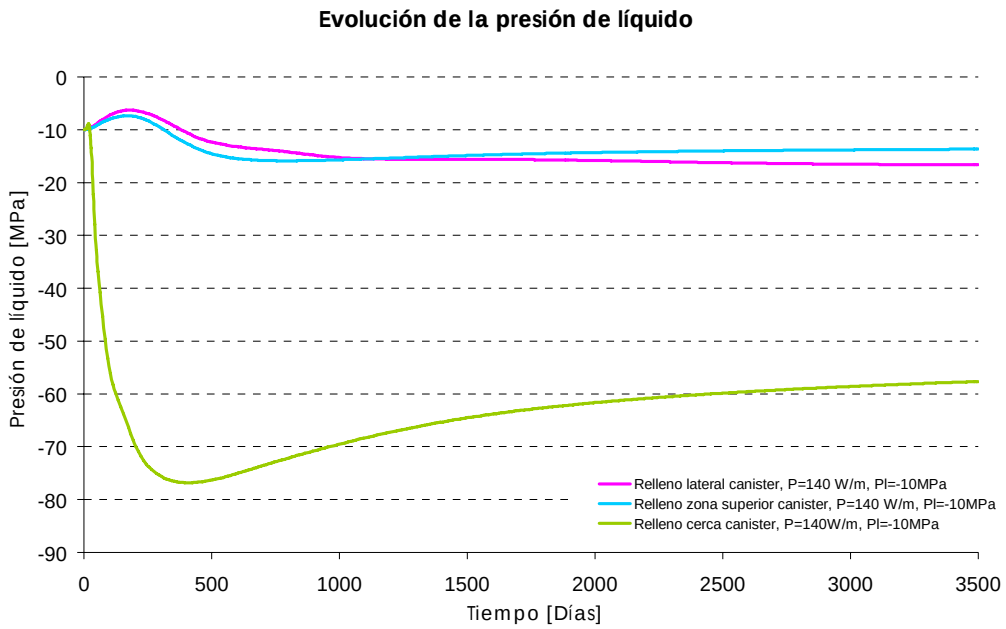

Figura 8.8 Evolución de la presión de líquido en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa.

En la Figura 8.8, las succiones aumentan muy rápidamente en las zonas más cercanas al calentador. Las presiones negativas son succiones, se alcanzan los -76MPa, posteriormente sufren un ligero descenso hasta llegar a un valor constante de -57MPa. En esta gráfica se puede interpretar que el relleno cercano al calentador se seca.

En el caso de los puntos más alejados la tendencia es al contrario: Las succiones disminuyen un poco al principio (de -10 hasta -7MPa y el relleno se humedece) para luego aumentar (de -7 hasta -13MPa, el relleno acusa los efector de la temperatura y seca) y se mantienen constantes en un valor cercano a -13MPa.

En la Figura 8.9 se observa como a medida que pasa el tiempo los valores de presión de líquido más pequeños tienden a alejarse de la zona del canister y a situarse en la zona superior de la galería. En cambio, en las zonas que rodean al canister las succiones son cada vez mayores.

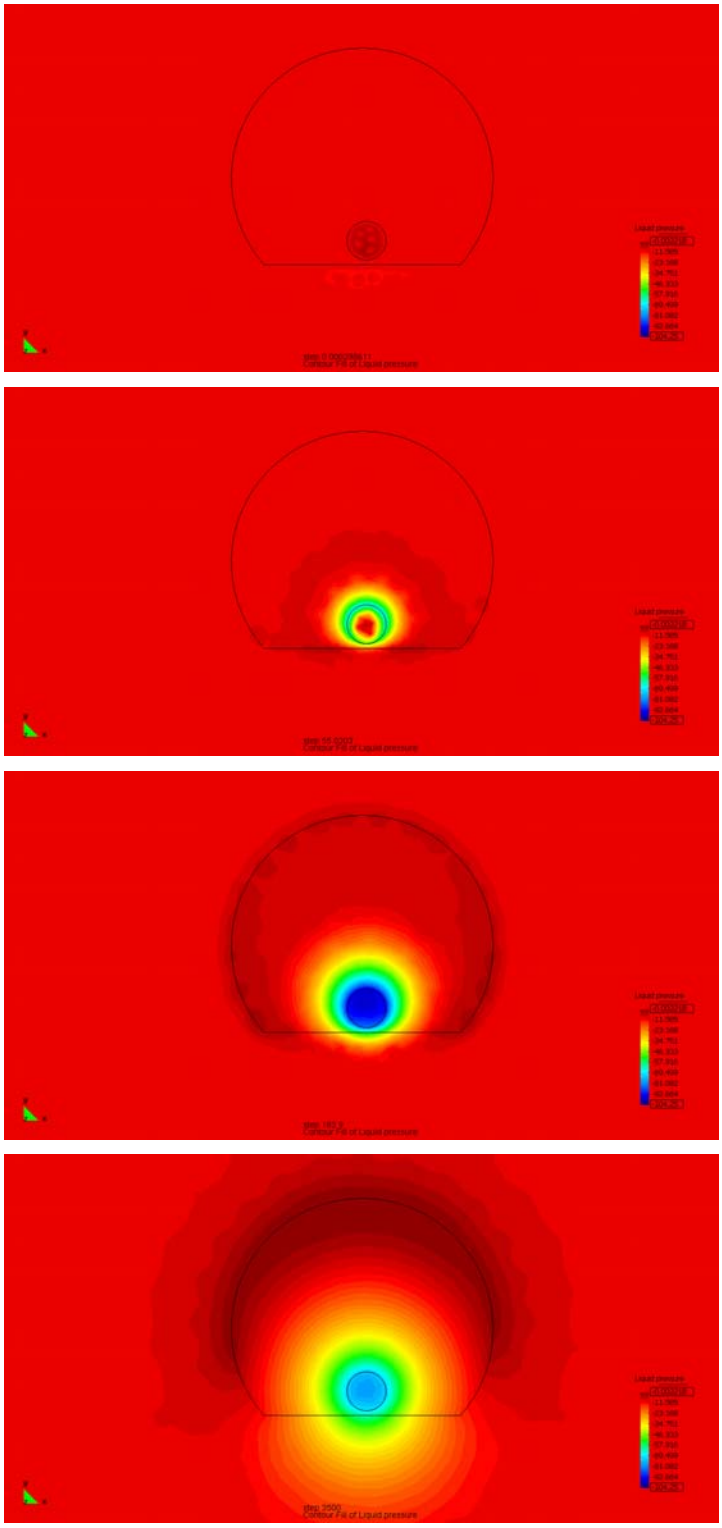

Figura 8.9 Distribución de la presión de líquido en el modelo para una P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 0, 55, 180 y 3.500 días.

8.1.3. RESULTADOS MECÁNICOS

La variación de la porosidad en relleno depende de la convergencia de las paredes de la galería. Además la convergencia se ve afectada por las variaciones de la temperatura y por la presencia de agua.

La evolución de la porosidad en los tres puntos de medida toman una misma tendencia, a grandes rasgos se puede decir que independientemente de su situación, en los tres puntos la porosidad disminuye de la misma manera, ver Figura 8.10.

Por ejemplo, en el punto situado en la zona superior del canister se parte de una porosidad inicial de 0,31 y al final de la simulación la porosidad es mínima y alcanza un valor de 0,073, esto supone una disminución del 76%. En el resto de puntos la variación sigue una misma tendencia.

En cuanto se realiza un análisis exhaustivo de la variación de la porosidad en el relleno (Figura 8.12) se observa un fenómeno importante: El hecho de haber implementado el modelo con el FADT implica que en las zonas donde el grado de saturación es mayor (techo de la galería y paredes) se produce una disminución bastante importante de la porosidad. Esto se debe a que la presencia de agua en esa zona produce fenómenos de disolución entre las partículas del relleno que tienden a reducir la porosidad, además la presencia del agua reblandece el material lo que implica una mayor deformabilidad.

En la Figura 8.12 se observa como la porosidad se reduce a medida que pasa el tiempo, además la reducción de la porosidad se inicia desde el techo y paredes de la galería hacia el canister.

Pasados los 3.500 días de simulación, la porosidad en la zona superior del relleno es muy cercana a la del macizo encajante.

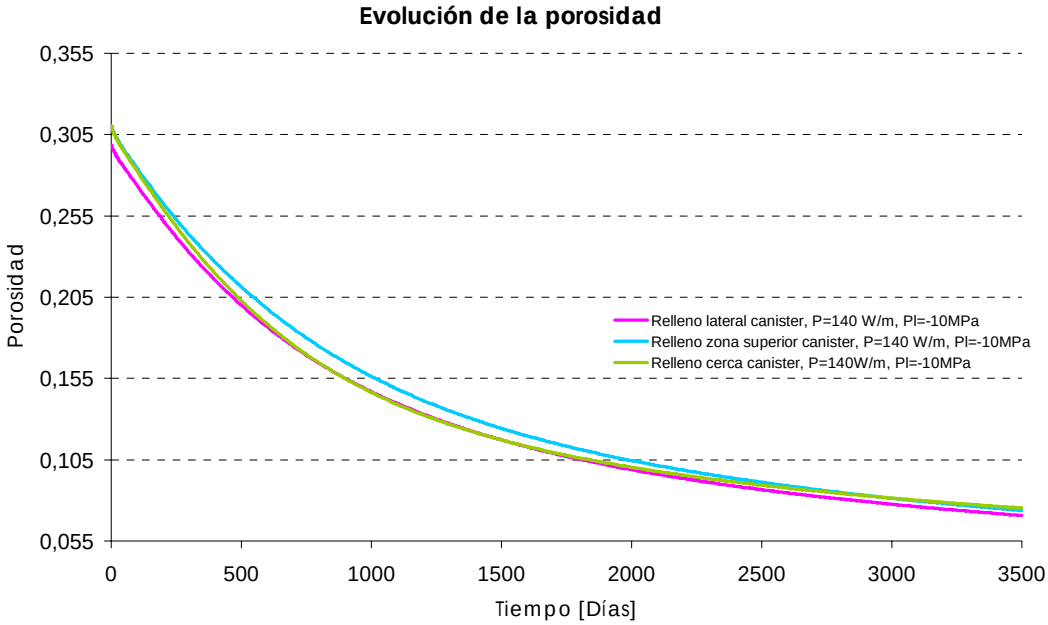

Figura 8.10 Evolución de la porosidad en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa.

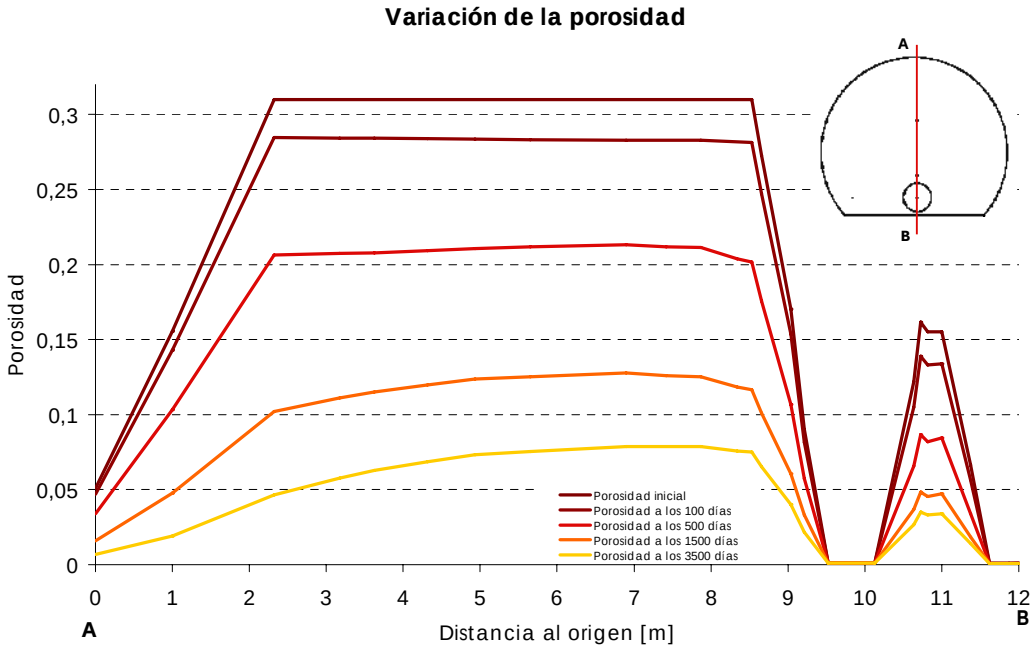

Figura 8.11 Variación de la porosidad en una sección vertical de la galería, para P=140W/m y Pl=-10MPa.

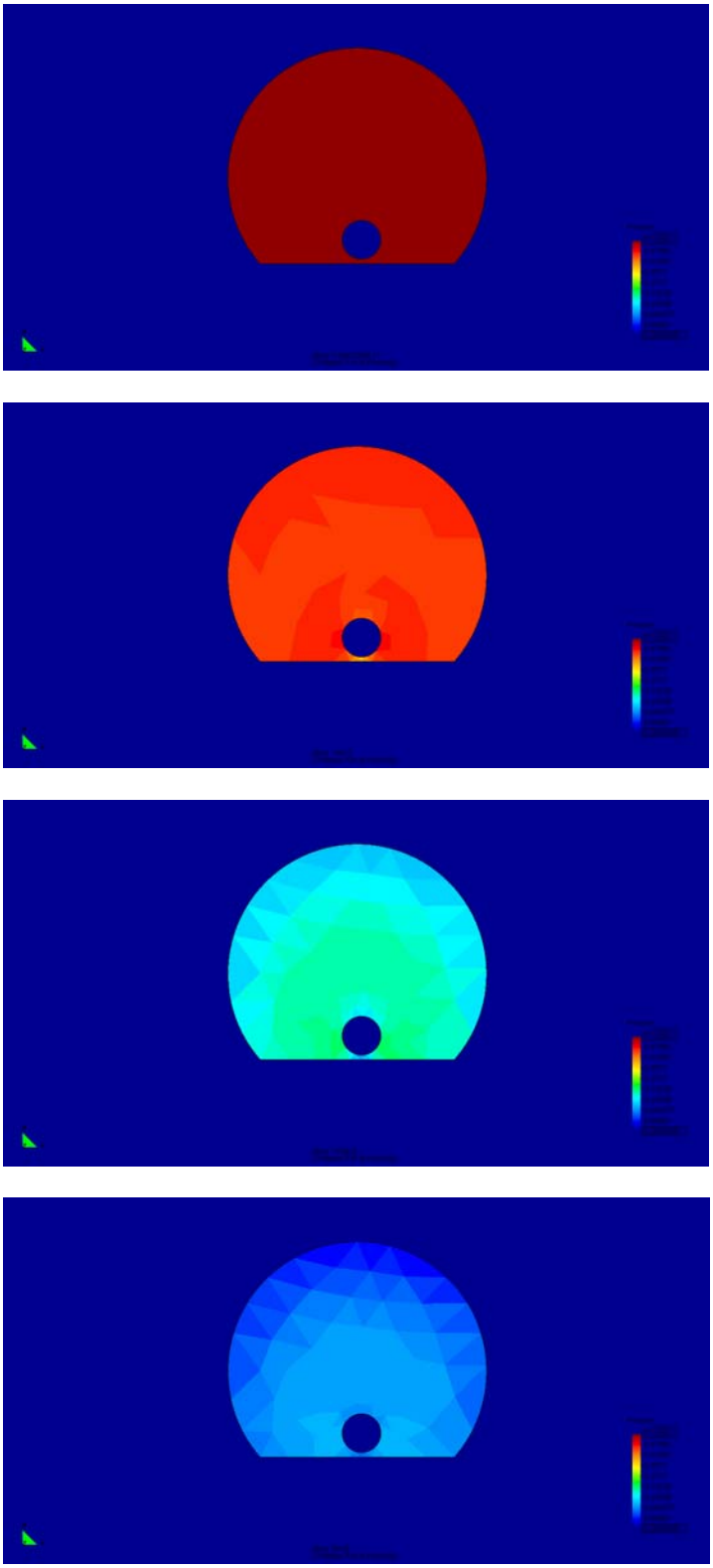

Figura 8.12 Distribución de la porosidad en el modelo para una P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

Se puede considerar que la evolución de los desplazamientos siguen una tendencia inversamente proporcional a la porosidad: Cuando la porosidad disminuye los desplazamientos aumentan. En la Figura 8.13 se observa como a medida que pasa el tiempo los desplazamientos son mayores, del orden de 0,5 metros en el lateral del calentador y del orden de 0,43m en la zona superior a éste. Las zonas más próximas al canister son las que menos se deforman, ya que éste lo impide.

La Figura 8.14 muestra la distribución de las deformaciones en el relleno durante varios momentos de la simulación. Los desplazamientos más importantes se concentran en el techo de la galería y en los laterales. A medida que pasa el tiempo, las zona más deformada es el techo de la galería. Este fenómeno se ha explicado anteriormente, los desplazamientos originados en el techo son fruto de la convergencia natural del macizo y de la reducción de la porosidad debida a la disolución local de en los contactos de granos de sal en el techo de la galería.

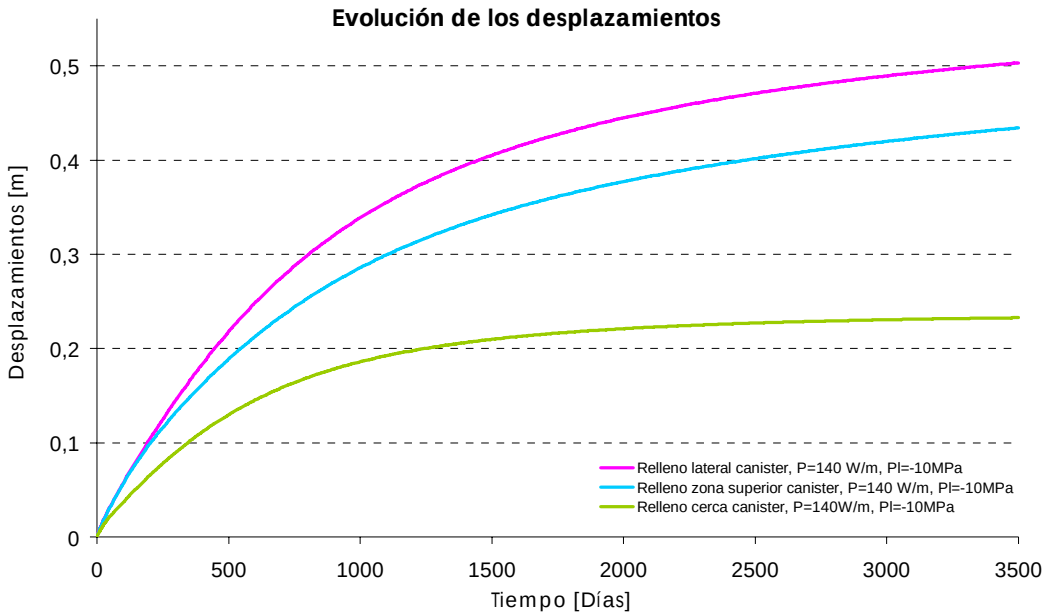

Figura 8.13 Evolución de los desplazamientos en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa.

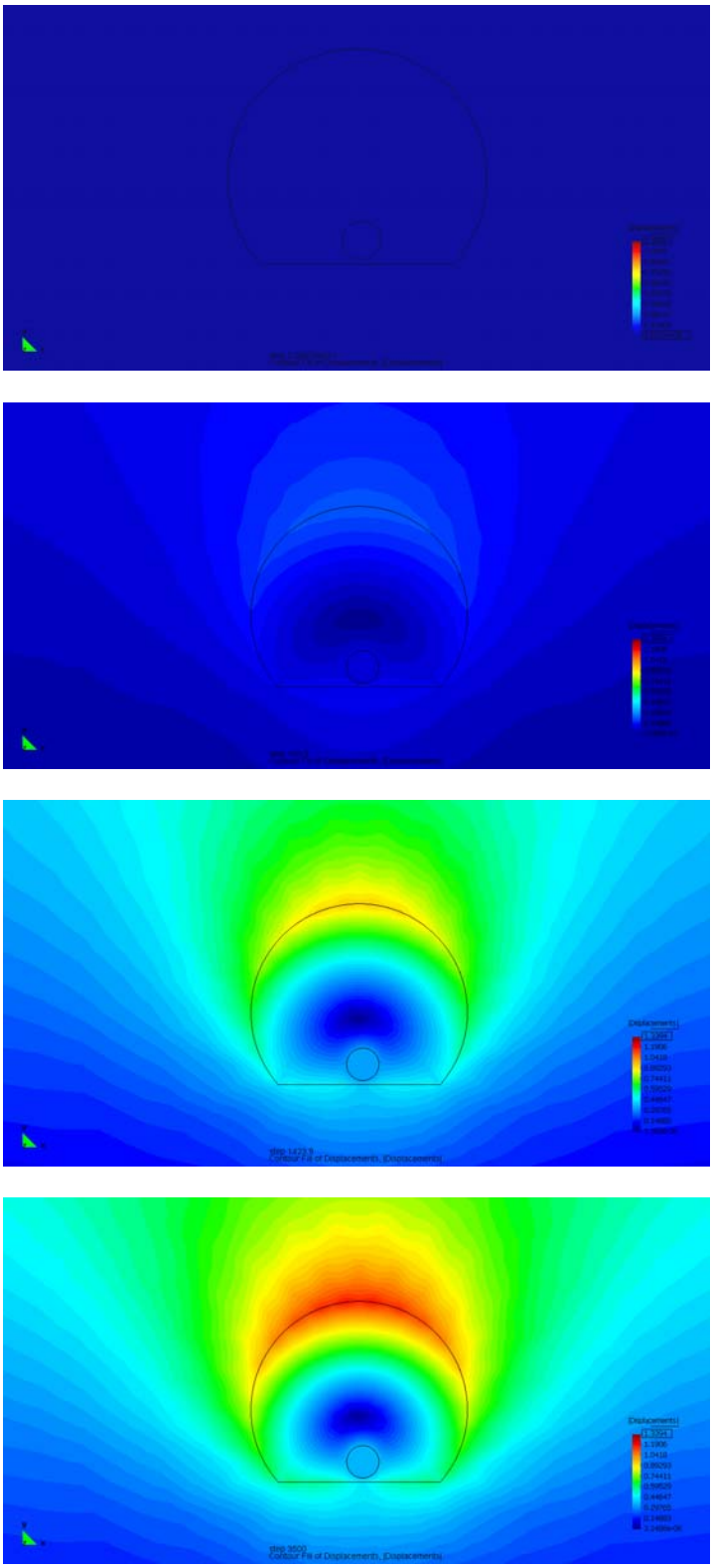

Figura 8.14 Distribución de los desplazamientos en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

Las tensiones en el relleno aumentan como consecuencia de la convergencia de la roca, que compacta el relleno, y de los procesos relatados anteriormente derivados de la acción conjunta de la temperatura y de la presencia de salmuera.

Las tensiones en el relleno tienden a igualarse o a alcanzar valores muy parecidos a los que presenta el macizo rocoso. En la Figura 8.15, el relleno presenta una tensión en torno a -10MPa y el macizo rocoso presenta tensiones de -11MPa, es decir, el relleno ha alcanzado un grado de compactación y porosidad muy parecido al del macizo.

La base de la galería y el canister son zonas de acumulación de tensiones de valores ligeramente mayores que los del relleno y del macizo rocoso, ver Figura 8.15. También se puede observar como las zonas del techo donde se condensa el vapor de agua, presentan tensiones menores (la presencia de agua implica una mayor deformabilidad del relleno) que las zonas más próximas al canister (zonas muy secas y poco deformables).

En la Figura 8.16 donde se observa como las tensiones aumentan (En valor absoluto) muy rápido, se produce una compresión. A partir de la aplicación del calor, los tres puntos de medida siguen una tendencia muy parecida: Las tensiones aumentan, pasando de una tensión inicial de 0MPa hasta alcanzar un valor constante de -11MPa. Los puntos de medida más cercanos al canister presentan tensiones mayores que -11,5MPa.

Las tensiones en los días 0, 200, 1.400 y 3.500 se presentan en la Figura 8.17, se observa como las tensiones van aumentando en el relleno a medida que pasa el tiempo. Este aumento de las tensiones se debe a que el relleno se compacta alcanzando unos valores de porosidad cercanos al del macizo rocoso.

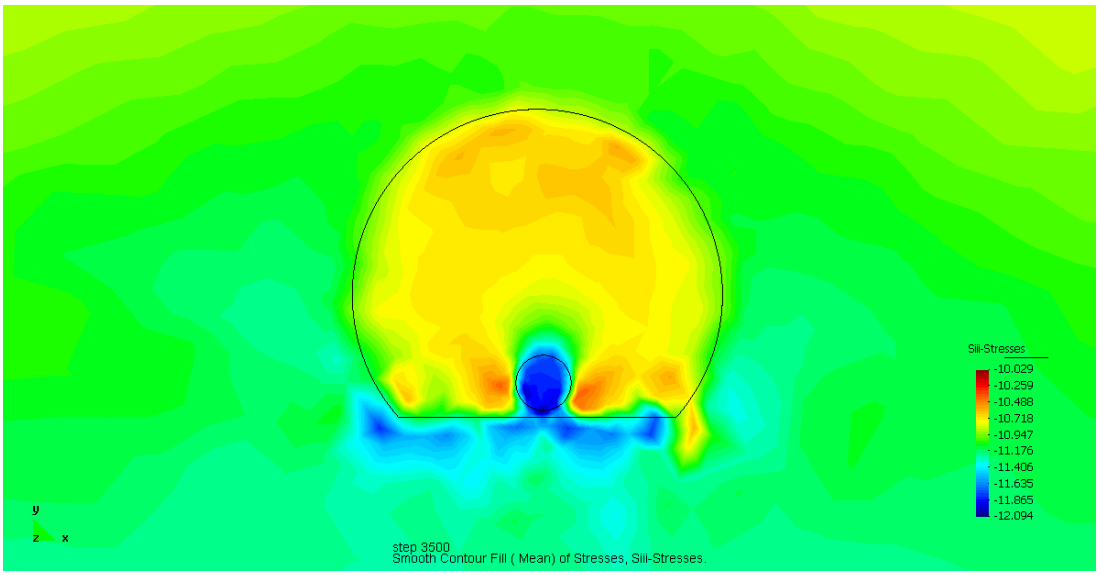

Figura 8.15 Distribución de tensiones en el modelo para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

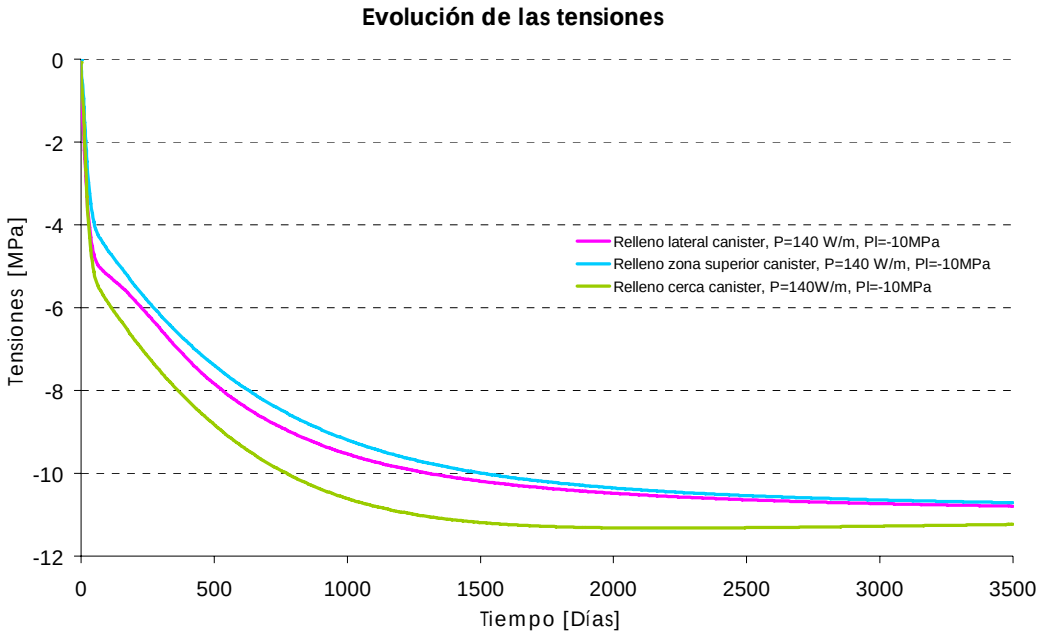

Figura 8.16 Evolución de las tensiones en varios puntos de medida para P=140W/m y Pl=-10MPa pasados 3.500 días.

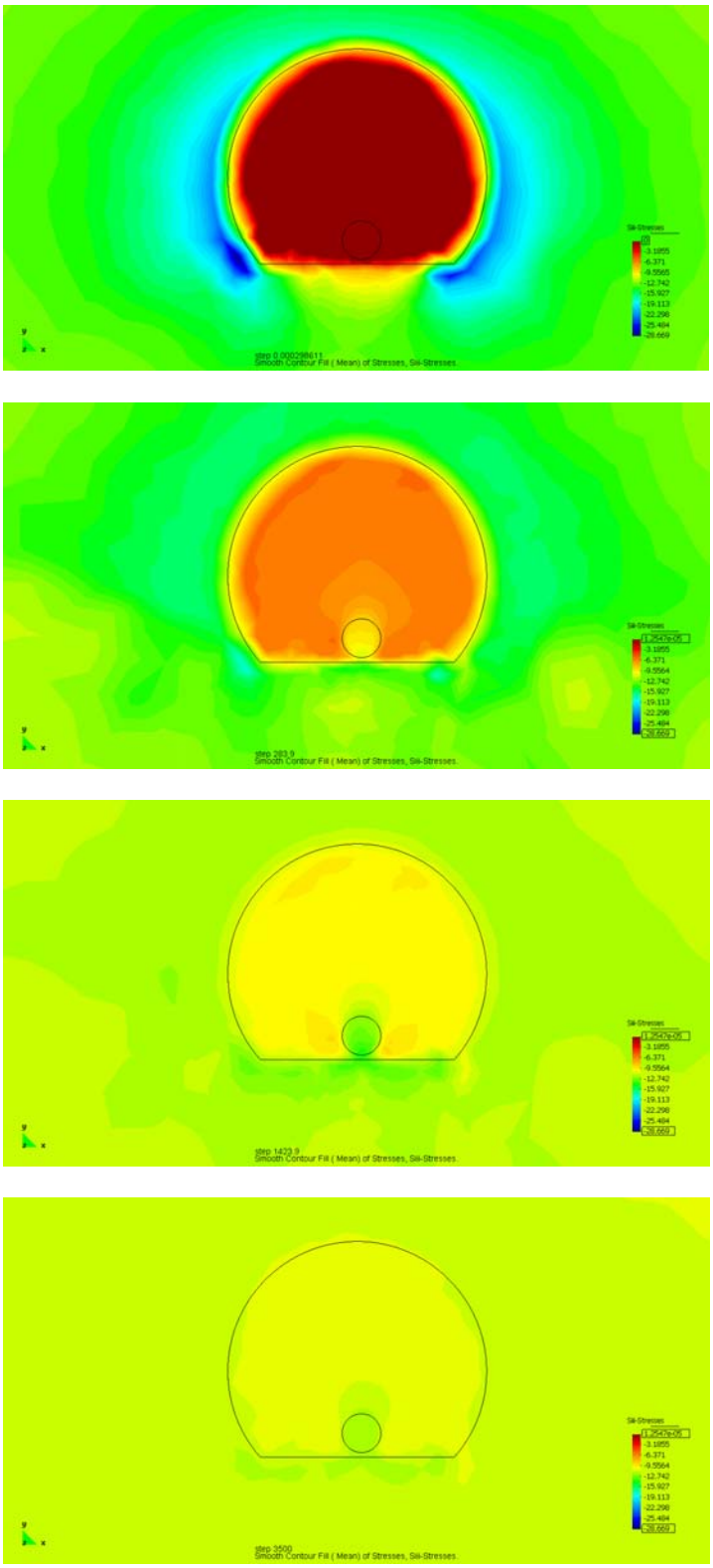

Figura 8.17 Distribución de tensiones en el modelo para una potencia de 140W/m y Pl=-10MPa pasados 0, 200, 1.400 y 3.500 días.

8.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se ha llevado a cabo una nueva simulación, la presión de líquido es de -1MPa, esto quiere decir que el grado de saturación en el relleno y en el macizo encajante es mayor que en el caso base, es decir, el ambiente será más húmedo. En el siguiente apartado se comparan los resultados obtenidos para esta simulación y la llevada a cabo en el apartado anterior (Pl=-10MPa).

Además se compararán los resultados del caso seco (DC) con los obtenidos para el modelo con el FADT implementado, de esta manera se podrá analizar el grado de influencia que tienen los mecanismos de deformación originados por la presencia de agua.

8.2.1. RESULTADOS TÉRMICOS

En el ambiente seco, el la temperatura en el calentador alcanzar los 58,5ºC mientras en el caso húmedo se alcanzan los 52ªC, ver Figura 8.18.

En la Figura 8.18 se puede ver que la tendencia de las dos simulaciones, húmeda y seca es distinta. En el caso del ambiente seco el canister se calienta muy rápido al principio y posteriormente la temperatura sigue aumentando.

En cambio, en ambiente húmedo el canister se calienta mucho más rápido al principio, alcanzando mayores temperaturas que en el caso seco para los mismos tiempos. Una vez ha alcanzado los 55ºC la temperatura del calentador empieza a descender y a estabilizarse en torno a los 52ºC.

Este fenómeno se debe a que el relleno se ha compactado más en el caso húmedo que en el seco y por tanto su conductividad térmica aumenta. La temperatura tiende a disiparse mejor ya que el relleno es más conductivo. También juega un papel importante la difusión del vapor de agua que transporta calor y humedad de las zonas más calientes a otras más frías. Como se puede ver en la Figura 8.18, cuanto mayor es el contenido en agua, mayor es la eficiencia del transporte del vapor y menor la temperatura que alcanza el canister.

Tal y como ocurre con el canister, el resto del relleno se comporta de una manera muy parecida. En la Figura 8.19 se observa como la evolución de la temperatura en la zona superior del canister para el caso seco tiene dos tendencias de crecimiento, en un primer momento aumenta la temperatura de una manera muy rápida y luego sigue aumentando pero más lentamente (para 3.500 alcanza los 47ºC). La temperatura no se estabiliza entorno a ningún valor ya que no hay ningún factor que limite el aumento de temperatura.

Todo lo contrario sucede en el caso húmedo, donde para las dos presiones de líquido consideradas, el relleno se estabiliza en una temperatura de 43ºC, ver Figura 8.19. Esta estabilización, como ya se ha comentado para el caso del canister, se debe al efecto del aumento de la conductividad térmica del relleno y al de la difusión de vapor, que transporta el calor hacia zonas más frías, actuado como refrigerador.

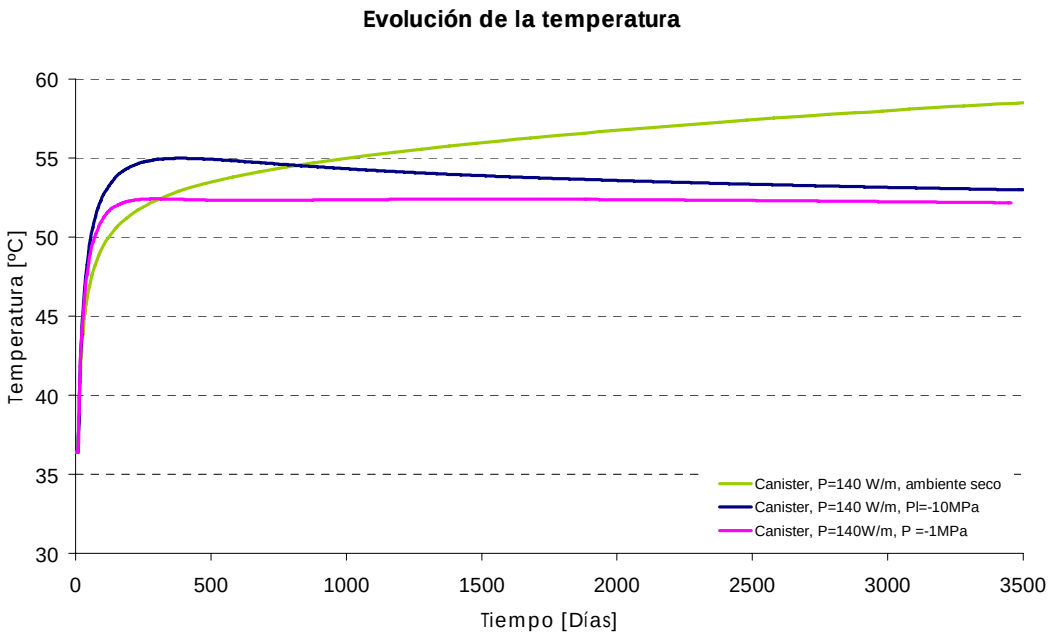

Figura 8.18 Evolución de la temperatura en el canister para las tres simulaciones.

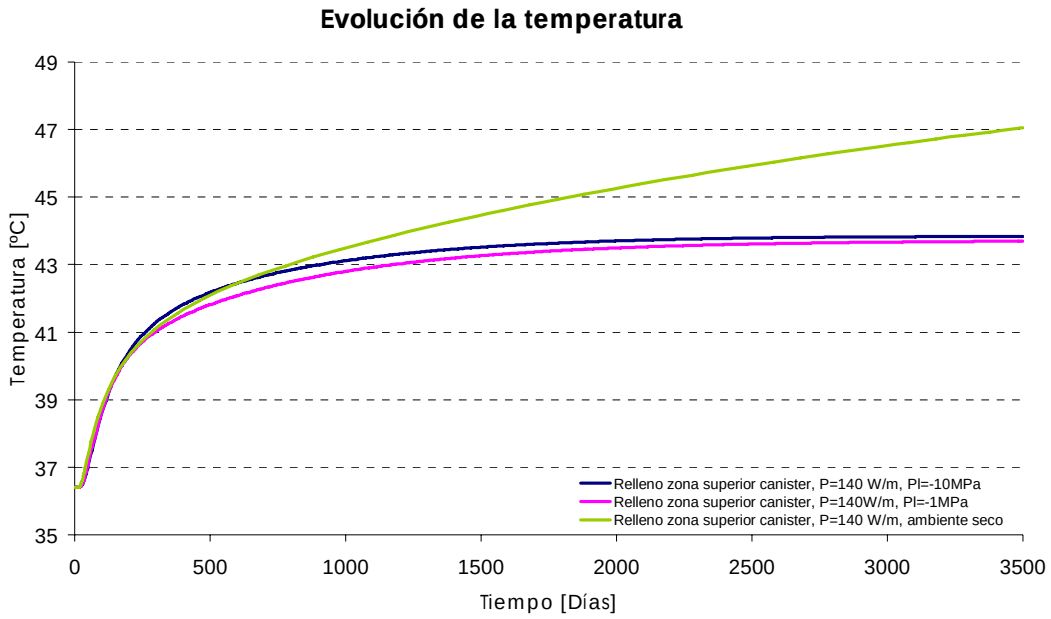

Figura 8.19 Evolución de la temperatura en la zona superior del canister para las tres simulaciones.

8.2.2. RESULTADOS MECÁNICOS

En la Figura 8.20 se analiza la evolución de la porosidad en un punto cercano al canister. La variación de la porosidad en el relleno para el caso seco es muy pequeña, del 10%, en cambio para el caso húmedo hay una variación mucho mayor: la porosidad pasa de una valor inicial de 0,31 a 0,08 en 3.500 días, es una variación del 74%.

A medida que el ambiente se humedece, se produce una reducción mayor de la porosidad, es decir, cuanta más agua hay, más deformables se vuelven el relleno y el macizo encajante. Por lo tanto, la acción conjunta de la convergencia de la roca, las variaciones de temperatura y las migraciones del vapor de agua aceleran las deformaciones del relleno.

En la Figura 8.21 se observa la variación de la porosidad en una sección vertical de la galería. El origen de la gráfica está situado en un punto del macizo sobre el techo de la galería. La porosidad disminuye mucho más en el caso húmedo que en el seco.

La Figura 8.22 permite hacer una comparativa visual de manera muy clara de la distribución de la porosidad en el relleno en cada caso: Se produce una reducción drástica de la porosidad al implementar el modelo con el FADT. Además para los casos más húmedos la porosidad final disminuye, por tanto, la presencia de agua en el modelo es una factor clave en el comportamiento del relleno.

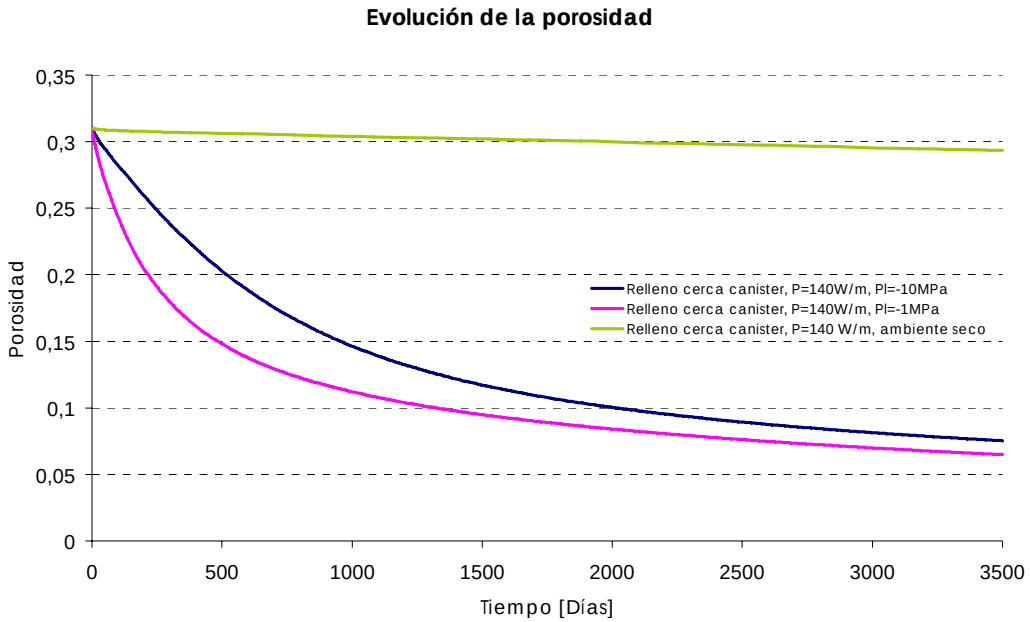

Figura 8.20 Evolución de la porosidad en la zona cercana al canister para las tres simulaciones.

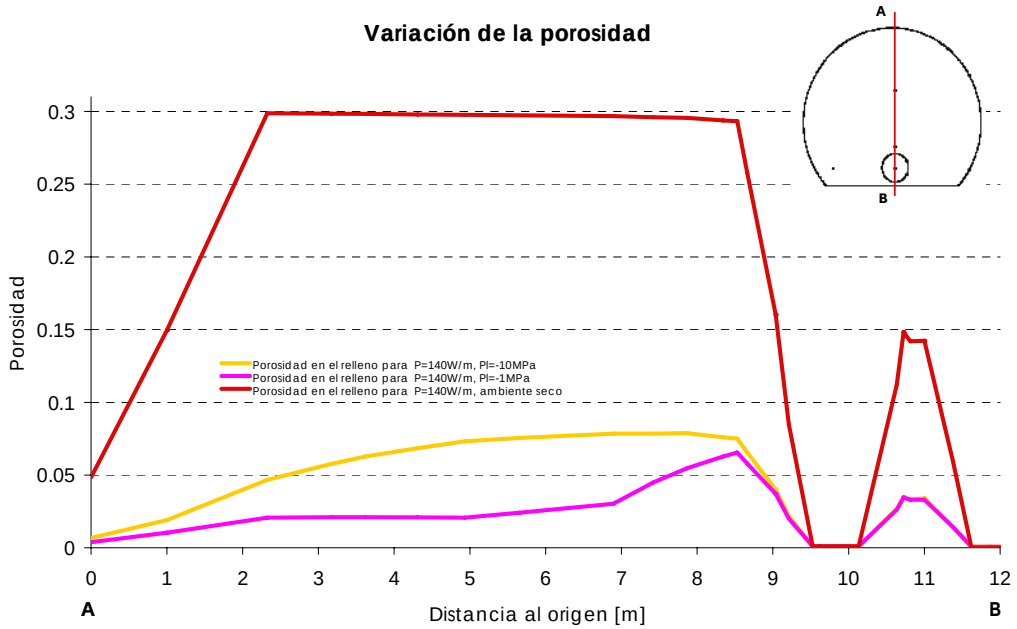

Figura 8.21 Variación de la porosidad en una sección vertical de la galería para las tres simulaciones.

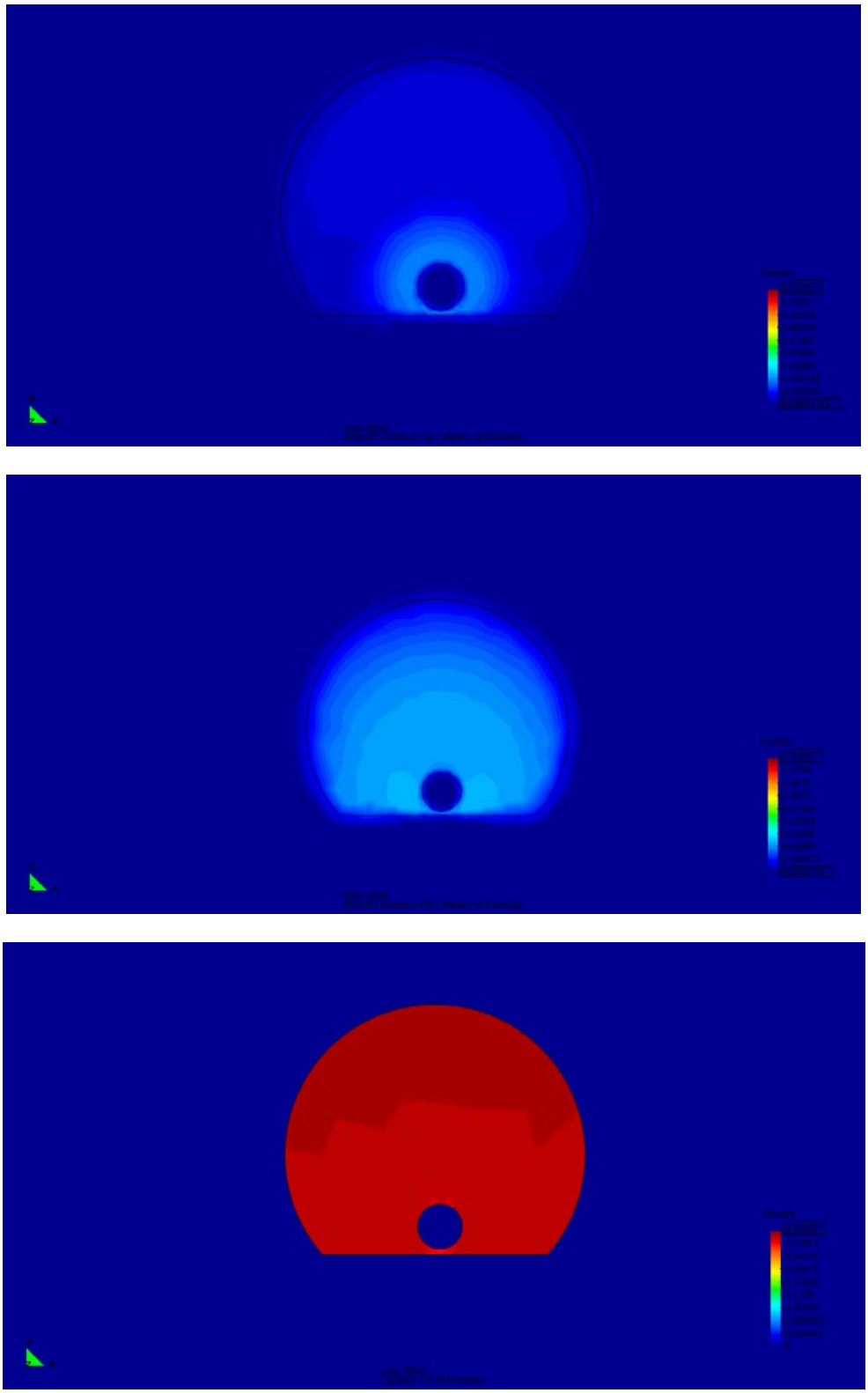

Figura 8.22 Distribución de la porosidad para los casos húmedos (Pl=-1MPa y Pl=-10MPa) y para el caso seco pasados 3.500 días.

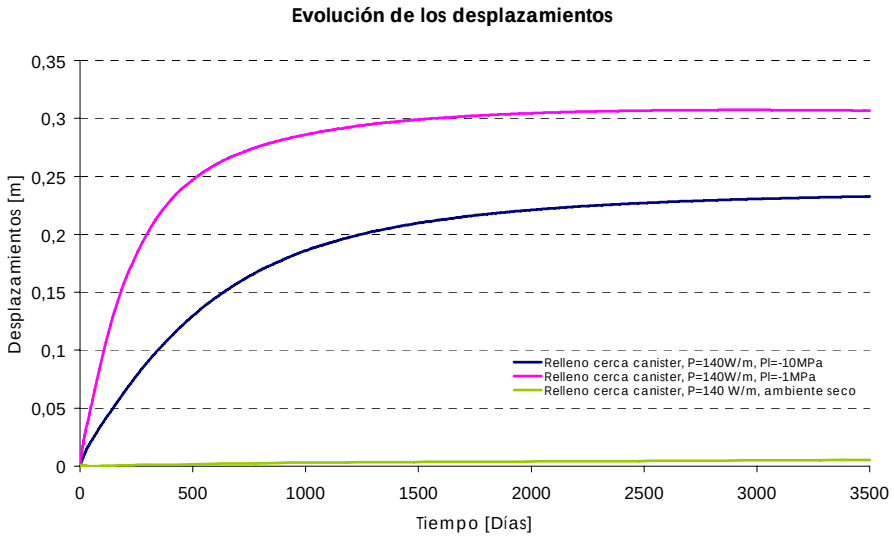

Figura 8.23 Evolución de la porosidad en la zona cercana al canister para las tres simulaciones.

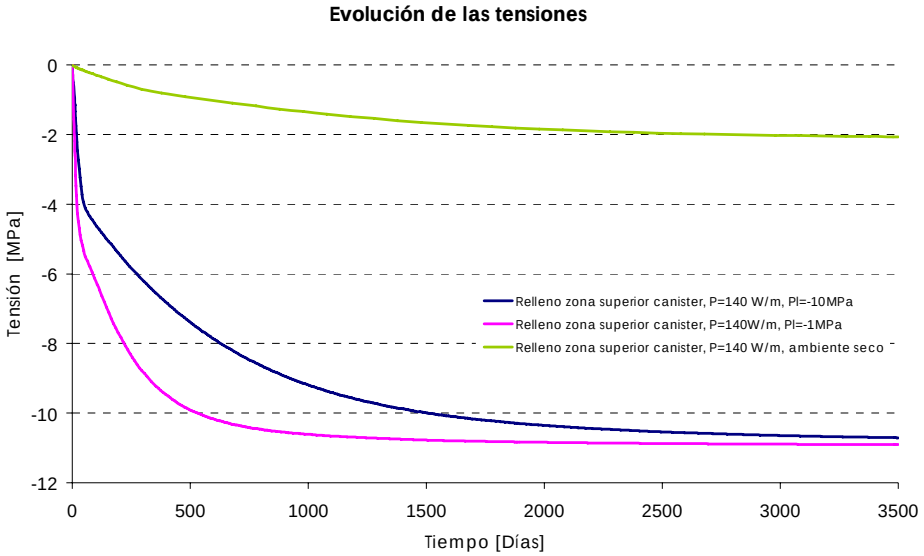

Figura 8.24 Evolución de las tensiones en la superior al canister para las 3 simulaciones.

La variación de la porosidad está causada por los desplazamientos del relleno, si éstos aumentan se producirá una reducción de la porosidad. Tanto es así, que la gráfica de desplazamientos es muy parecida a la de porosidad, ver Figura 8.23.

Las tensiones en el relleno aumentan a medida que éste se compacta. En el ambiente seco las tensiones aumentan progresivamente y de una manera muy lenta alcanzando un valor de -1MPa. En cambio, en el caso húmedo las tensiones aumentan rápidamente, más rápido cuanto mayor es el contenido en agua, hasta mantenerse entorno a un valor de -11MPa.

Las tensiones son diez veces más grandes en el mismo punto en el caso del ambiente húmedo que en el seco, y esto es así porque la porosidad del relleno en ese punto también es mucho más pequeña en el ambiente húmedo que en el seco, ver Figura 8.24.

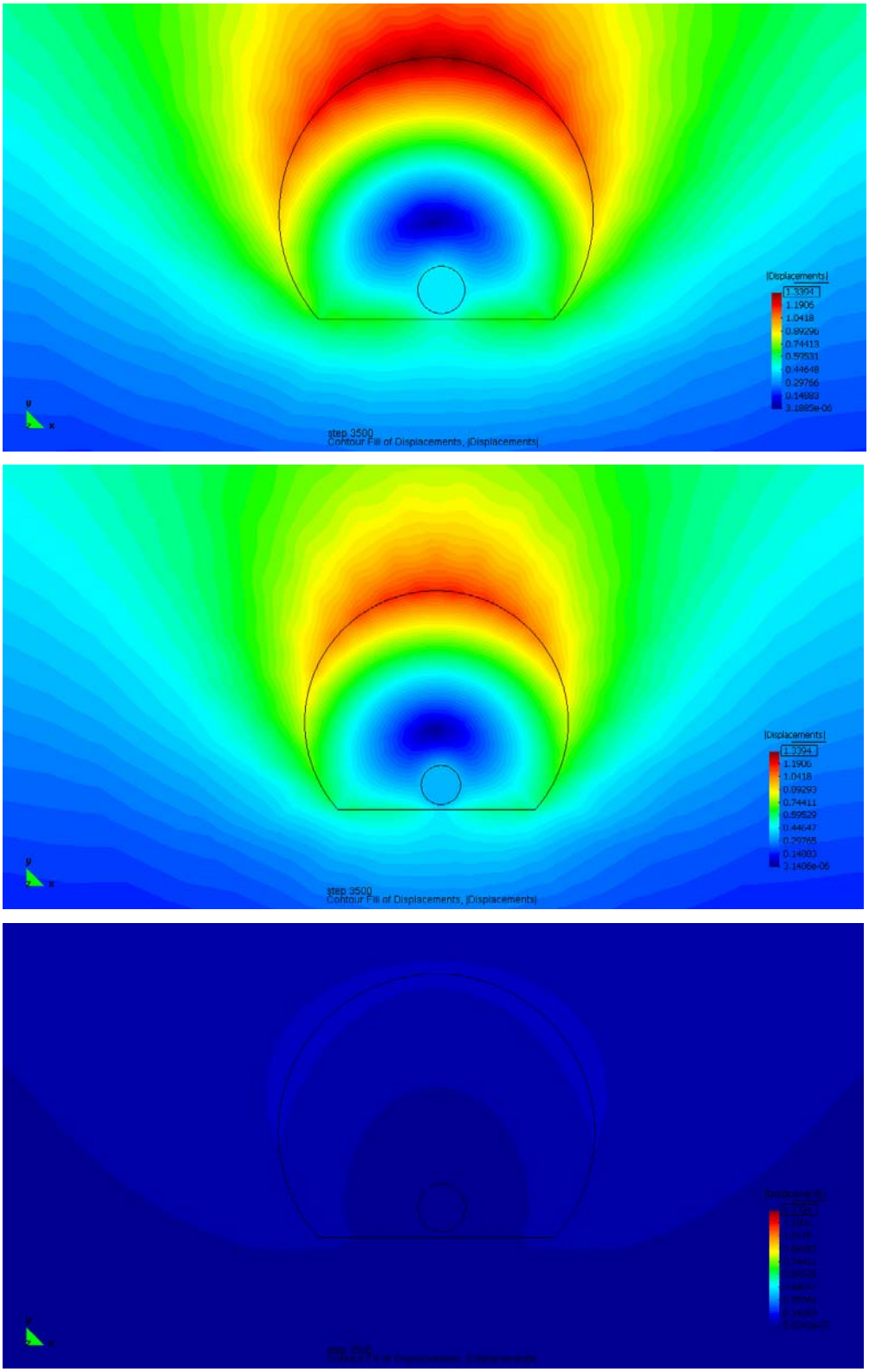

Figura 8.25 Distribución de los desplazamientos para los casos húmedos (Pl=-1MPa y Pl=-10MPa) y para el caso seco pasados 3.500 días.

8.2.3. RESULTADOS HIDRAÚLICOS

En lo que se refiere a resultados hidráulicos, únicamente se comparan los dos casos en ambiente húmedo, (El caso seco no presenta resultados hidráulicos).

Se analiza la evolución de la presión de agua, en el punto más cercano al canister para las dos casos considerados y se observa como ambas curvas siguen una tendencia parecida: una disminución inicial de la presión, y luego se estabilizan en un valor constante. En el caso del ambiente más seco (Pl=-10MPa) se alcanza una presión de -58MPa y la trayectoria de la curva de presiones es más exagerada que para el caso más mojado que tiende a un valor de -27MPa.

Como se ha comentado en el análisis del caso base, este aumento de la presión se debe al secado del material cercano al canister.

Por el contrario, en los puntos más alejados del calentador, en los dos casos considerados la presión tiende a subir en los momentos iniciales, debido a un humedecimiento de la zona, luego desciende y se mantiene constante alrededor de -12Mpa para el caso más seco y -10MPa para el más húmedo, ver Figura 8.26.

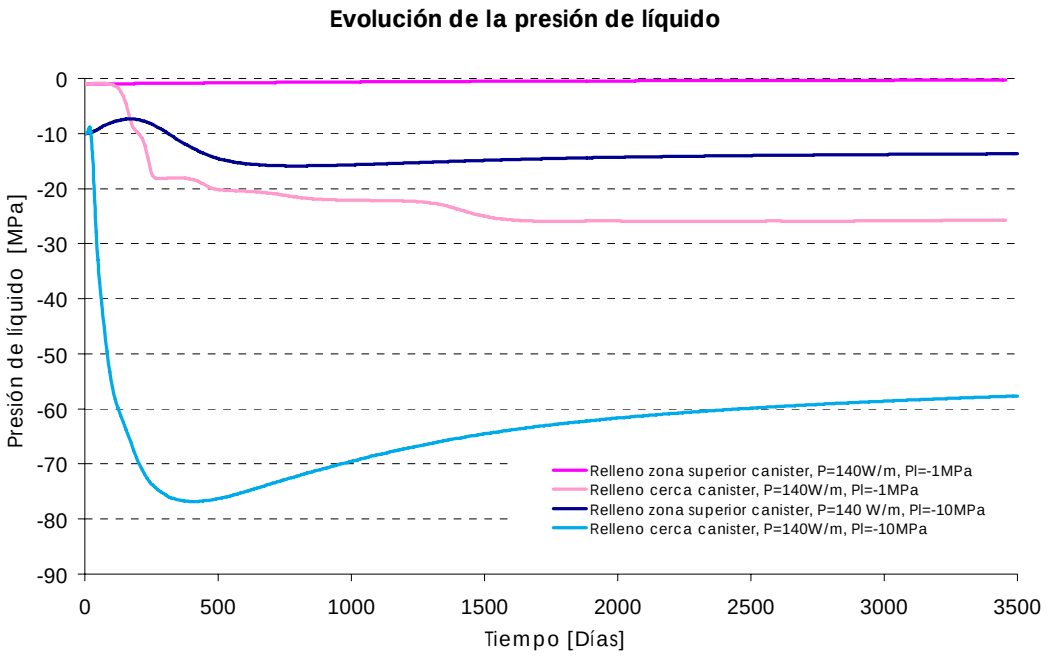

Figura 8.26 Evolución de la presión de líquido en varios puntos del relleno para las dos simulaciones en ambiente húmedo pasados 3.500 días.

En la Figura 8.26 se reflejan los resultados de las gráficas de evolución de la presión de agua. En el caso más seco, las succiones más grandes se concentran cerca del calentador, mientras que las más pequeñas se concentran en el techo de la galería. El relleno presenta un rango muy amplio de presiones, desde 0 a -100MPa.

En cambio, para el caso más húmedo, en la práctica totalidad del relleno presenta una presión muy parecida, muy cercana a los -10MPa que nos indicaba la gráfica excepto en la zona del canister, que se concentran las mayores succiones.

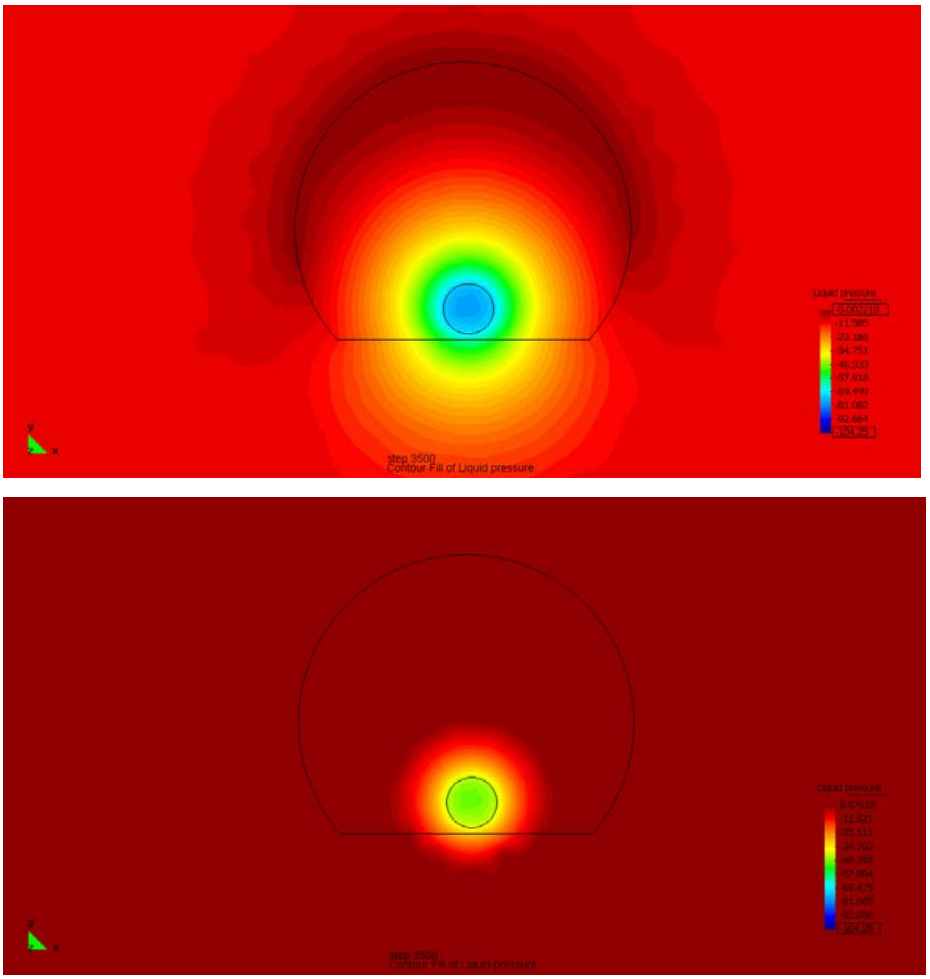

Figura 8.27 Distribución de presiones de agua para el caso en que Pl=-10MPa MPa y Pl=-1MPa pasados 3.500 días de simulación.

En lo que se refiere al grado de saturación, para el caso más húmedo, en el lateral del canister tiende a aumentar muy rápidamente, cosa que no pasa en el caso más seco, que aumenta ligeramente al principio pero luego se estabiliza entorno a un valor constante, ver Figura 8.28.

A los 3.500 días en el mismo punto (lateral del canister) el grado de saturación es de 0,06 (si Pl=-1MPa), en el caso de Pl=-1Mpa el grado de saturación vale 0,001.

La Figura 8.29 representa la distribución de los valores del grado de saturación en el relleno pasados 3.500 días, para el caso en que Pl=-10MPa y Pl=-1MPa, los dos con la misma escala.

Para el caso más húmedo se alcanzan grados de saturación próximos a 0,5 (los puntos rojos situados en la base de la galería) que corresponden a zonas del macizo rocoso en contacto con el perímetro de la galería, esto se debe a que el vapor de agua se condensa en la zona de transición de materiales.

En la Figura 8.29, el caso más seco (Pl=-10MPa), se indica que el grado de saturación es mucho menor que en el caso más húmedo (prácticamente todo el relleno es de color azul) y que la zona de máximos se sitúa en la parte superior de la galería.

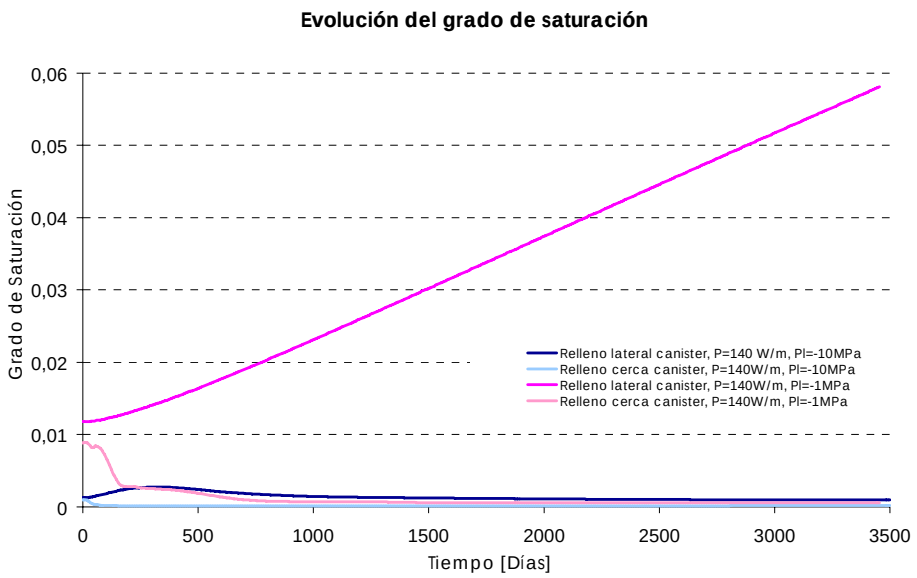

Figura 8.28 Evolución del grado de saturación en varios puntos del relleno para las dos simulaciones en ambiente húmedo pasados 3.500 días.

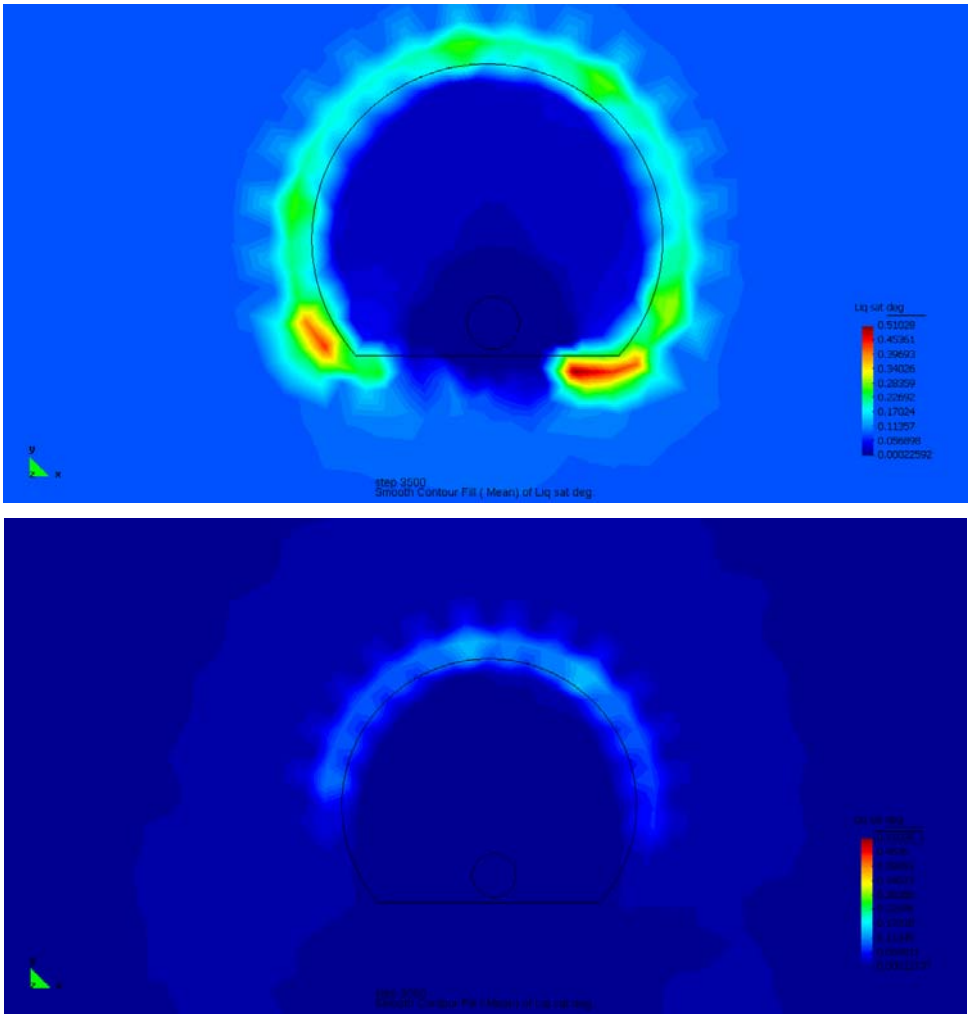

Figura 8.29 Distribución del grado de saturación para el caso en que Pl=-1 MPa y Pl=-10MPa pasados 3.500 días de simulación.

9. CONCLUSIONES

Una vez realizado el análisis de resultados de la simulación en ambiente seco, se puede concluir:

- En cuanto a los resultados térmicos:

  - Los flujos de calor producen un calentamiento del relleno y de la roca encajante, esto es debido a que son materiales de baja conductividad.
  - Los flujos de calor tienden a ser más grandes en la roca encajante que en el relleno debido a su mayor conductividad.
  - La temperatura máxima de todos los puntos se corresponde con los del final de la simulación.

- En cuanto a los resultados mecánicos:

  - Por efecto de la convergencia natural de la roca el relleno se compacta y su porosidad se reduce en orden del 3%, la variaciones de temperatura realzan los efectos de la convergencia.
  - Las zonas de menor porosidad son las más cercanas al calentador.
  - Al disminuir la porosidad, en el relleno aumenta su conductividad térmica.
  - Los desplazamientos máximos se encuentran en las paredes y el techo.
  - A medida que el relleno disminuye su porosidad éste se vuelve más compacto y las tensiones aumentan, éstas son del orden de diez veces menores en el relleno que en la roca encajante.
  - Para mayores potencias residuales se producen mayores desplazamientos (se acelera la convergencia de las paredes de la galería), también se producen mayores reducciones de porosidad y aumentan las tensiones en el relleno.

Estos resultados hacen referencia a un período de simulación de diez años.

Las conclusiones obtenidas a partir de analizar los resultados de la simulación en ambiente húmedo son las siguientes:

- En cuanto a los resultados térmicos:

  - A medida que se introducen los flujos de calor en el modelo, el relleno y la roca encajante se calientan.
  - Los flujos de calor tienden a ser más grandes en la roca encajante que en el relleno debido a su mayor conductividad.
  - Se produce un fenómeno de refrigeración en el relleno debido a la reducción su porosidad y a la presencia de agua. Ésta reducción de la hace que el relleno se compacte y aumente su conductividad térmica. También se producen fenómenos de migración de vapor desde la zona más cercana al canister, donde se evapora el agua, desplazándose hasta las zonas más frías transportando calor y humedad. El relleno disipa de manera eficiente los flujos de calor emitidos por el canister.

- En cuanto a los resultados mecánicos:

  - La porosidad en el relleno se reduce alrededor de un 70% debido a la convergencia de la roca, la variación de temperatura y a la presencia de salmuera ayudan a que los efectos de la convergencia se amplifiquen. La porosidad del relleno se reduce desde la zona de

contacto con el macizo rocoso, donde se condensa el vapor. La presencia de agua en el relleno lo hace más deformable y además se pueden producir fenómenos de disolución local entre los granos de sal del relleno.
  - La presencia de la salmuera y de humedad en el ambiente acelera la convergencia del macizo rocoso ya que éste se vuelve más deformable.
  - En general, las tensiones aumentan en el relleno a medida que se compacta. Al final de la simulación el relleno presenta una tensión muy parecida a la del macizo, en torno a -11MPa.
  - Los desplazamientos máximos se dan en el techo debido a los procesos relacionados con la presencia de agua y salmuera, que hacen que el macizo rocoso y el relleno se vuelvan mucho más deformables.

- Resultados hidráulicos:

  - El grado de saturación presenta dos tendencias distintas en el relleno. En la zona más cercana al canister se produce la evaporación del agua de la salmuera y, por tanto, disminuye el grado de saturación. En cambio en zonas más alejadas del canister, se condensa el vapor de agua cuando entra en contacto con zonas más frías como el macizo rocoso.
  - A este movimiento del vapor de agua, desde zonas calientes a otra más frías, se le llama migración por difusión, este movimiento provoca a su paso fenómenos de precipitación y disolución de la sal.
  - La presión de líquido sigue una tendencia parecida al grado de saturación. En la zona cercana al canister la succión aumenta, en cambio disminuye en la zona del techo de la galería y de la roca encajante.

Estos resultados hacen referencia a un período de simulación de diez años.

Una vez realizado un análisis comparativo entre los resultados obtenidos para el caso seco y el húmedo se pueden extraer unas conclusiones generales que se resumen a continuación:

- Los rellenos de agregados salinos porosos están sometidos a condiciones térmicas, hidráulicas y mecánicas; por lo que suceden fenómenos del tipo THM. El gran número de interacciones simultáneas que se dan entre estos procesos obliga a tenerlos en cuenta al simular el comportamiento del relleno.

- A medida que aumenta la potencia residual, aumenta la temperatura que alcanza el relleno y la roca encajante, y por lo tanto, se amplifican los fenómenos dependientes de la temperatura.

- Las variaciones térmicas aceleran la fluencia de la sal y la convergencia natural de la roca favorece que las deformaciones continúen. El relleno juega un papel fundamental a la hora de conducir el calor desprendido por el canister al macizo encajante, realizando así tareas de disipación de calor.

- La porosidad se reduce en el relleno debido a la convergencia de las paredes de la galería, estas variaciones afectan a la conductividad térmica, además aumentan las tensiones del relleno. A medida que disminuye la porosidad del relleno este se convierte en un material mucho más compacto y sus propiedades se acercan a las del macizo rocoso.

- Cambios en las condiciones hidráulicas, como por ejemplo la presencia de salmuera en el relleno, afectan a la temperatura debido a la aparición de

fenómenos de evaporación de agua y a la existencia de gradientes de presión de vapor que generan migraciones de agua.

- La difusión del vapor origina fenómenos de disolución y precipitación locales en los contactos de los granos de sal del relleno que reducen la porosidad.

- La presencia de salmuera en el relleno, lo hace más deformable, acelerando la reducción de la porosidad del relleno y el aumento de las tensiones hasta valores muy próximos al del macizo encajante, cosa que no sucedía en el caso seco, donde los valores de las tensiones y de la porosidad del relleno al final de la simulación eran muy diferentes a los del macizo rocoso.

Consideraciones a tener en cuenta en futuros estudios:

Una vez desarrolladas las conclusiones, se puede afirmar que la presencia de agua en el relleno, la potencia residual del canister y la convergencia natural de la roca son los factores de mayor importancia a la hora de simular el comportamiento de los AGP en macizos rocosos salinos. Por tanto, en futuros estudios en el campo de los AGP en macizos salinos habría que tener en cuenta las siguientes consideraciones:

La temperatura es un factor determinante porque acelera la fluencia del relleno y del macizo rocoso. Al poner en práctica este tipo de almacenamiento de residuos hay que controlar la temperatura que alcanzarán dichos residuos. En el caso que la temperatura que alcancen sea superior a la que pueda soportar el macizo se pueden mantener almacenados en las centrales nucleares hasta que la temperatura sea idónea.

Las tensiones que alcanzan el relleno y el macizo rocoso son valores claves a la hora de dimensionar los contenedores de los residuos, ya que tienen que ser capaces de resistir altas tensiones y temperaturas inducidas por el canister.

La presencia de humedad en el dominio es un factor favorable para nuestro problema, ya que a medida que aumenta la humedad en el ambiente el relleno se compacta y disminuye su porosidad; ésto favorece el aislamiento de los residuos.
Sin embargo la presencia de agua en el ambiente puede producir disoluciones y precipitaciones de sal a media escala y corrosiones de los contenedores de residuos, en algún caso se pueden originar fugas de contaminantes.

Al realizar simulaciones del comportamiento de este tipo de almacenamientos se debería tener en cuenta los procesos químicos relacionados con la sal, ya que se pueden producir fenómenos de disolución y precipitación generalizados que afecten al comportamiento de la roca. Además la simulación se debería realizar en tres dimensiones para obtener resultados más próximos a la realidad, de esta manera se obtendrían resultados más fiables.

10. REFERENCIAS

Bechthold, W., T. Rothfuchs, A. Poley, M. Ghoreychi, S. Heusermann, A. Gens, S. Olivella, (1999): Backfilling And Sealing Of Underground Repositories For Radioactive Waste In Salt (Bambus Project), EUR 19124 EN, CEC.

Bechthold, W. and W. Bollingerfehr (2001): Backfilling and Sealing of Underground Repositories for Radioactive Waste in Salt, Phase Ii, (Bambus Project), Proc. Cluster URL Seminar Mol.

Departamento de Ingeniería del Terreno, ETSECCPB – UPC, (2001): CODE_BRIGHT USER'S GUIDE, Barcelona.

Olivella S., A. Gens, J. Carrera y E.E. Alonso, (1996) "Numerical formulation for a simulator (CODE_BRIGHT) for the coupled analysis of saline media", Engineering Computations, Vol. 13 No. 7, pp. 87-112.

Olivella S. y A. Gens, (2002) "A constitutive model for crushed salt", International journal for numerical and analytical methods in geomechanics; Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 26:719 – 746 (DOI: 10,1002/pág.220).

Rothfuchs, T., Prij, J., Kröhn, K.-P., Van den Horn, B.A., Wieczorek, K. (1996): The DEBORA- Project Phase I. Development of Borehole Seals for High-Level Radioactive Waste Repositories in Salt Formations, Final Report, EUR 16928 EN, CEC, Bruselas.