

Capítulo 10: Resumen, Conclusiones y Líneas de trabajo futuro

10.1 Resumen

La presente tesis doctoral se ha desarrollado en el marco del proyecto Engineered Barrier Emplacement Experiment (proyecto EB, AITEMIN, 2001a). En él se estudia la utilización de un material formado por pellets de bentonita como material aislante en la construcción de almacenamientos profundos para residuos radiactivos. El proyecto se compone de dos actividades fundamentales. Un programa de laboratorio y un ensayo a escala real realizado en el laboratorio subterráneo de Mont Terri, Suiza. Esta tesis está asociada al programa de laboratorio realizado para caracterizar el comportamiento hidromecánico del material. Los trabajos realizados se han desarrollado en estrecho vínculo con las necesidades y requerimientos de las restantes actividades del proyecto. En el plan de trabajo ejecutado se distinguen tres etapas fundamentales.

Una primera etapa en la que se estudiaron las propiedades geotécnicas básicas (límites de Atterberg, densidad de sólidos, humedad higroscópica) y las características de la estructura interna del material. Se realizaron ensayos de intrusión de mercurio sobre muestras de pellets con distintos valores de densidad seca, se estudió la evolución del contenido de agua de las diferentes fracciones del material en equilibrio con un ambiente de humedad relativa controlada y se realizaron varios ensayos de infiltración. A partir de los resultados obtenidos se determinaron las características de la estructura interna del material y se definió la curva granulométrica óptima para una mezcla de pellets. Se limitó el tamaño mínimo de pellets en 0.4 mm para evitar la segregación del material durante las operaciones de transporte y colocación. El tamaño máximo de pellet se limitó en función de las dimensiones de la muestra a ensayar.

En una segunda etapa se definió una metodología de trabajo adecuada para caracterizar el comportamiento hidromecánico de las mezclas de pellets de bentonita y se realizaron los distintos ensayos de laboratorio. El proceso de fabricación de los pellets de bentonita, así como la realización de los ensayos, ha requerido de un protocolo y una metodología de trabajo bien definida. Las mezclas de pellets de bentonita precalentadas, tienen un muy bajo contenido de agua inicial (3-4%) y el valor de succión inicial medido resulta cercano a los 250 MPa. Esto determina, que para poder

caracterizar el comportamiento del material a lo largo del proceso de mojado, sea necesario el uso de distintas técnicas experimentales de medida y control de la succión de forma combinada, (Romero 2001, Hoffmann *et al.* 2005a) Por otra parte y debido al uso de un sistema de hidratación artificial en el proceso de hidratación de la barrera estudiada en el ensayo a escala real, se producen distintas cinemáticas de hidratación. Para poder reproducir las posibles situaciones en las que se puede encontrar el material a lo largo de este proceso de hidratación, es necesario adaptar los equipos de laboratorio y los sistemas de medida convencionales, para crear dispositivos de ensayo adecuados a cada caso. Los resultados experimentales obtenidos en esta segunda etapa se presentaron divididos en tres grupos. Un primer grupo donde se incluyeron los resultados de los ensayos de caracterización del comportamiento hidráulico. En un segundo grupo, se presentaron los resultados de los ensayos de expansión, hinchamiento y compresibilidad con control de la succión. Finalmente se presentó un tercer grupo de ensayos, en los que se estudio la influencia del tipo de transferencia de agua (transferencia en forma de vapor y agua líquida) y de las condiciones de contorno iniciales de la inyección de agua en la respuesta del material.

En la tercera etapa del plan de trabajo se realizó el análisis de los resultados obtenidos en los distintos ensayos de laboratorio. Este análisis se realizó partiendo de las ideas y conceptos planteados en el modelo constitutivo para materiales expansivos BExM (Barcelona Expansive Model, Gens & Alonso, 1992 y Alonso *et al.* 1999). A partir de este análisis se determinaron los factores que resultaron más importantes en la respuesta del material. Se adaptaron los conceptos propuestos en este modelo al caso de las mezclas de pellets de bentonita y se implementó en un código numérico utilizando la técnica de las diferencias finitas. Se presentó una metodología para la deducción de los parámetros del modelo y se compararon las predicciones del modelo con los resultados experimentales.

Adicionalmente, se realizaron una serie de ensayos de mediana escala (ensayos de columna de infiltración), donde se estudió la respuesta del material en una muestra de mediana escala y en condiciones similares a las existentes en el ensayo a escala real. Estos ensayos permitieron minimizar los efectos de escala y resultaron en una herramienta muy importante para contrastar los resultados obtenidos a lo largo del extenso programa de ensayos a escala más reducida.

10.2 Conclusiones

Las conclusiones de los trabajos realizados se presentan en correspondencia con cada uno de los objetivos planteados. Se plantean tres grupos de conclusiones:

- Metodología de trabajo.
- Resultados experimentales.
- Marco conceptual y modelo constitutivo.

10.2.1 Metodología de trabajo

En la definición de una metodología de trabajo adecuada para la caracterización de las mezclas de pellets de bentonita se tuvieron en cuenta dos aspectos fundamentales: las características del proceso de fabricación de las mezclas de pellets y las características del sistema de hidratación utilizado en el ensayo a escala real.

Como resultado del proceso de fabricación de las mezclas de pellets de bentonita se obtiene un material granular formado por unidades de alta densidad seca ($\rho_d=1.95 \text{ Mg/m}^3$) y con un bajo contenido de agua (3-4%). El valor de la succión medido sobre muestras fabricadas utilizando mezclas de pellets preparadas a distintos valores de densidad seca varió entre 250-300 MPa. Para poder investigar el comportamiento del material y controlar la succión a lo largo del proceso de hidratación fue necesario utilizar de forma combinada distintas técnicas experimentales. En este caso se utilizaron de forma muy satisfactoria dos técnicas de control de la succión. La técnica de transferencia de vapor mediante desecadores/humidificadores para valores de succión entre 300 y 3 MPa y la técnica de traslación de ejes con transferencia de líquido para valores de succión entre 3 MPa y saturación (Hoffmann *et al.* 2005a).

Por otra parte, debido a la escasez de agua disponible en la roca que aloja el almacenamiento (Opalinus Clay, formación que contiene el ensayo a escala real Mont Terri, Suiza; Bossart, 1999), y para asegurar la saturación de la barrera de ingeniería en períodos de ensayo razonables, en el ensayo a escala real se consideró un sistema de hidratación adicional. Este sistema artificial, está formado por una serie de tubos longitudinales conectados entre sí por niveles y permiten inyectar agua en el material. El agua entra en el sistema de tubos por un único punto en el que se controla la presión y

se mide el volumen de agua inyectada, Figura 3.1. La utilización de este sistema de hidratación condiciona a que determina que durante el proceso de saturación se produzcan en el material diferentes velocidades de hidratación. Los poros grandes ubicados en zonas cercanas a los tubos de inyección se saturarán de forma rápida por efecto de la inundación, mientras que los poros pequeños de los gránulos evolucionarán de forma más lenta y se saturarán por un proceso difusivo. Para poder reproducir y estudiar las distintas situaciones que pueden ocurrir durante la saturación, se diseñaron numerosos dispositivos y procedimientos de ensayo. Se acondicionaron equipos de laboratorio y sistemas de medida existentes para poder utilizar diferentes técnicas de transferencia de agua y aplicar diferentes velocidades de humedecimiento.

De forma general podemos decir que la metodología de trabajo desarrollada a lo largo de esta tesis ha resultado adecuada para explorar las características fundamentales del comportamiento de las mezclas de pellets de bentonita compactada. Se han calibrado y adaptado técnicas experimentales y equipos de laboratorio para realizar ensayos con control de la succión en rangos de succiones entre 300 MPa y la condición de saturación, (Hoffmann *et al.* 2005a). Finalmente, se han modificado y adaptado numerosos dispositivos auxiliares de ensayo que han permitido estudiar la respuesta del material a lo largo de trayectorias hidráulicas y mecánicas complicadas. Los dispositivos de ensayos utilizados, que se describen en el Capítulo 3, permiten simular las distintas condiciones en las que se puede encontrar el material durante el humedecimiento y controlar la evolución de las diferentes variables a lo largo de dicho proceso.

10.2.2 Resultados experimentales

Se realizaron numerosos ensayos sobre muestras con distintos valores de densidad seca. Los resultados experimentales se han presentado divididos en cuatro grupos. Un primer grupo de resultados se ha presentado en el Capítulo 1, donde se describen las propiedades geotécnicas básicas y las características de la estructura interna del material. Posteriormente, en el Capítulo 4, se presentaron otros tres grupos de resultados: ensayos de comportamiento hidráulico, ensayos de comportamiento mecánico (expansión, hinchamiento y compresibilidad) y ensayos en los que se estudia la influencia del tipo de transferencia de agua (vapor o líquido) y la velocidad de humedecimiento en la respuesta del material. A continuación se indican las

características más importantes del material, relativas a cada uno de los grupos de resultados presentados.

10.2.2.1 Características geotécnicas y estructurales del material

Las mezclas de pellets de bentonita de elevada densidad, son materiales granulares formados por unidades altamente expansivas. El estudio de la estructura interna del material se realizó fundamentalmente a partir de ensayos de intrusión de mercurio (MIP). Estos ensayos han resultado ser una herramienta de análisis de gran utilidad en la identificación de los distintos mecanismos internos de cambio de volumen que ocurren en el material. En tanto en procesos mecánicos (compactación), un aumento de la carga produce una reducción de vacíos asociada fundamentalmente a la reducción de los vacíos entre pellets, a lo largo de trayectorias hidráulicas (humedecimiento) se observa la aparición de un tercer modo de poros muy probablemente asociado al incremento de volumen de los gránulos de alta densidad, Figura 5.10, (Romero *et al.* 2003b).

Para obtener muestras con densidades secas mayores de 1.15 Mg/m^3 se requirió la utilización de una compactación mecánica adicional. Las muestras se prepararon utilizando un método de compactación estática unidimensional. De los análisis realizados se deduce que el procedimiento de preparación utilizado no afecta mayormente la granulometría del material para muestras con densidades secas menores de 1.5 Mg/m^3 . Este hecho se constata al observar los cambios en la granulometría antes y después de la compactación. Así mismo, el análisis de la distribución de poros entre pellets mediante porosimetrías de mercurio permitió estudiar los mecanismos de reducción de vacíos que predominan durante el proceso de compactación. Para muestras con densidades menores a 1.5 Mg/m^3 , el mecanismo predominante es el reordenamiento de granos tal como se indicó anteriormente, mientras que para densidades mayores a 1.5 Mg/m^3 se produce una rotura importante de partículas con un desplazamiento del modo dominante del tamaño de poros hacia valores inferiores, Figuras 1.26 y 1.29.

Las mezclas de pellets son materiales en los que se identifican varios conjuntos de poros con tamaños característicos diferentes. Los distintos conjuntos se pueden agrupar bien por tamaño o por su ubicación estructural, dentro o fuera del pellet. En este caso, se utilizó un criterio de clasificación de poros de acuerdo a su ubicación. Así se identificaron los poros inter-pellet caracterizados por su gran tamaño e interconexión y los poros intra-pellet caracterizados por su menor tamaño y escasa conexión. Este

criterio está fundamentado en los cambios que se producen en el material por efecto de la carga y el mojado en cada uno de los conjuntos de poros dominantes. Un aumento en el nivel de carga aplicada produce una disminución de volumen asociada fundamentalmente a la reducción de los vacíos entre pellet, dejando a los poros dentro de los pellets casi intactos. Por otro lado, un incremento en el contenido de agua, produce un aumento del volumen de la muestra asociado a la aparición de un nuevo conjunto de poros que parece corresponder con la porosidad intra-pellet, Figura 5.10.

10.2.2.2 Comportamiento hidráulico

Para caracterizar el comportamiento hidráulico del material se realizaron tres tipos de ensayos diferentes: ensayos de permeabilidad saturada, ensayos de infiltración y ensayos de curvas de retención.

El comportamiento del material en condiciones saturadas se estudio en ensayos de permeabilidad con gradiente constante. Se observó que la permeabilidad saturada está controlada por la densidad seca de la muestra. Los resultados obtenidos en loa distintos ensayos están en correspondencia con la información reportada en el proyecto Febex (ENRESA, 2000).

Para estudiar la evolución de la permeabilidad del material durante el proceso de hidratación, se realizaron ensayos de infiltración. Estos ensayos permiten estudiar la evolución de las diferentes variables durante el proceso de mojado: evolución del contenido de agua en la muestra, densidad seca y de la permeabilidad con el grado de saturación. A lo largo de estos ensayos se observó que la respuesta del material está caracterizada por la existencia de dos etapas con comportamientos completamente diferentes. Una etapa inicial, donde el agua entra en la muestra a través de la porosidad entre pellets y en la que se registran valores permeabilidad característicos de los materiales granulares. Luego de esta etapa inicial, los pellets de bentonita comienzan a hidratarse y expanden invadiendo la porosidad entre pellets. En esta segunda etapa, el volumen de agua que entra por unidad de tiempo se reduce y la permeabilidad disminuye varios órdenes de magnitud. Los cambios estructurales que se producen durante el proceso de hidratación resultan en grandes cambios en las características hidráulicas del material. Este hecho pone de manifiesto, la importancia que tiene la estructura interna del material, así como su evolución.

Se realizaron curvas de retención a volumen constante sobre muestras preparadas con distintos valores de densidad seca. Comparando los resultados experimentales obtenidos durante trayectorias de mojado (Figura 4.14), se pueden definir al menos dos zonas de almacenamiento de agua bien diferenciadas: una zona dominada por la capilaridad del material entre pellets y una zona caracterizada por el almacenamiento dentro de las unidades expansivas o pellets. En la zona de almacenamiento caracterizada por el efecto capilar, las muestras presentan un almacenamiento diferente que depende del índice de vacíos (Romero *et al.* 2001).

10.2.2.3 Comportamiento de expansión, hinchamiento y compresibilidad

Se realizaron distintos ensayos para estudiar el comportamiento del material en condiciones edométricas y de volumen constante. A partir de éstos se han determinado las características de cambio volumétrico del material con la succión, presión de hinchamiento y compresibilidad frente a carga.

Se observa que el cambio de volumen en los ensayos de humedecimiento en condiciones edométricas, está determinado tanto por la densidad seca del material como por el nivel de carga vertical aplicado. Los cambios de volumen a carga vertical constante en los ensayos de humedecimiento para distintos valores de densidad seca inicial y carga vertical aplicada se resumen en la Figura 4.20.

En los ensayos de volumen constante se determinó la evolución de la presión de hinchamiento del material durante el proceso de mojado. El valor de dicha presión al final del ensayo está controlado por la densidad seca inicial de la muestra. Los valores obtenidos en los distintos ensayos realizados, Figura 4.30, están de acuerdo con los resultados reportados en el proyecto Febex (ENRESA, 2000).

La evolución de la presión de hinchamiento y de la deformación volumétrica observada en los distintos ensayos está caracterizada por la existencia de dos niveles estructurales distintos. Un nivel macroestructural caracterizado por los contactos granulares y un nivel microestructural, caracterizado por el comportamiento de las unidades granulares de alta densidad. Este hecho se deduce de la observación de algunos fenómenos como la aparición de deformaciones de colapso durante el inicio de la etapa de mojado (ensayos de humedecimiento a carga vertical constante, Figura 4.19), y la existencia de dos

ramas de crecimiento a diferentes velocidades en la evolución temporal de la presión de hinchamiento vertical (ensayos de humedecimiento a volumen constante, Figura 4.27).

La evolución de la compresibilidad del material con la succión se estudió a partir de ensayos de carga-descarga a succión constante en condiciones edométricas. Se han determinado los coeficientes de compresibilidad en carga, en descarga y los valores de la presión de preconsolidación para distintos valores de succión. Las características fundamentales del comportamiento mecánico del material y su variación con la succión están de acuerdo con las ideas planteadas por Alonso *et al.* (1990) en el modelo BBM. Utilizando las leyes constitutivas planteadas en el modelo se han ajustado los valores experimentales de los distintos coeficientes de compresibilidad y presión de preconsolidación.

10.2.2.4 Efecto de la forma de transferencia y de inyección de agua

Se realizaron ensayos utilizando diferentes tipos de transferencia de agua (en forma de vapor y en forma líquida) y distintas condiciones de contorno para la inyección de agua. Se observa que las distintas condiciones de mojado provocan distintas respuestas constitutivas (Hoffmann *et al.* 2003). Estos resultados ponen en evidencia que para reproducir el comportamiento de este tipo de materiales es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Existen en el material dos potenciales de agua distintos. Un potencial de agua asociado a los vacíos interiores a los pellets (succión micro, s_m) y un potencial de agua asociado al agua que se almacena en los vacíos entre pellet (succión macro, s_M).
- La incorporación de agua en cada uno de los niveles estructurales provoca respuestas constitutivas muy diferentes. Por ejemplo, el colapso asociado al humedecimiento de la macroestructura o la expansión que produce el humedecimiento de las unidades granulares.
- La evolución de la succión en cada uno de los niveles estructurales está influida por las distintas condiciones de contorno (disponibilidad de agua y velocidad de humedecimiento).

De acuerdo con los comportamientos observados, la evolución del comportamiento durante el mojado se puede describir considerando dos situaciones extremas: una situación en la que se produce un mojado “lento”, y en el cual ambas succiones se reducen y evolucionan esencialmente en equilibrio ($s_m \approx s_M$) y una segunda situación en la que se produce un mojado “rápido”. En este último caso, inicialmente se produce la saturación de la macroestructura ($s_M \approx 0$) y posteriormente se satura la microestructura de forma más lenta y en búsqueda del equilibrio con el potencial de la macroestructura (succión macro). Ambas situaciones fueron satisfactoriamente estudiadas a partir de las diferentes técnicas y dispositivos experimentales.

10.2.3 Marco conceptual y modelo constitutivo

10.2.3.1 Modelo planteado

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, el comportamiento de las mezclas de pellets de bentonita está caracterizado por la existencia de dos niveles estructurales diferentes. Un nivel microestructural caracterizado por el comportamiento expansivo de las unidades granulares y un nivel macroestructural caracterizado por la interacción entre los gránulos de bentonita (Figura 5.7). Para reproducir los aspectos fundamentales del comportamiento del material, se partió de las ideas consideradas y la formulación planteada por Gens & Alonso (1992) en el Modelo Expansivo de Barcelona (BExM).

Tomando como punto de partida dichos conceptos, se planteó el modelo para el caso particular de las mezclas de pellets de bentonita. El modelo se implementó en un código numérico utilizando la técnica de las diferencias finitas. El lenguaje de programación utilizado fue MATLAB. La adaptación del modelo BExM al caso de las mezclas de pellets de bentonita se realizó a partir de las siguientes consideraciones:

- Cada uno de los niveles estructurales tiene asociada una red de poros con características muy distintas. El nivel macroestructural tiene asociado un conjunto de poros de gran tamaño y muy interconectados entre sí. El nivel microestructural tiene asociado un conjunto de redes de poros correspondientes a los vacíos dentro de cada pellet.
- Ambos niveles estructurales se encuentran conectados entre sí de forma jerárquica. La porosidad macro contiene y conecta a cada uno de los

subconjuntos de poros micro. Esto resulta determinante en el proceso de hidratación: el agua entra en la muestra a través de los macroporos interconectados y posteriormente se incorpora en la microestructura.

- Durante el proceso de hidratación se asume que las unidades microestructurales están conectadas únicamente con la macroestructura y no intercambian agua entre sí.
- Se asume un comportamiento de tipo elastoplástico para cada uno de los niveles estructurales y que reproducen mecanismos de cambio volumétrico diferentes.
- La interacción y compatibilidad entre niveles estructurales se materializa aplicando el equilibrio de tensiones y balance de masa a nivel de pellet. No se considera la existencia de un acoplamiento constitutivo entre niveles estructurales. Es decir que un proceso de humedecimiento de la microestructura no afecta las características de la macroestructura tal como se plantea en el modelo para materiales expansivos BexM (Barcelona Expansive Model, Gens & Alonso, 1992).

10.2.3.2 Deducción de parámetros

Se ha propuesto una metodología para la obtención de los distintos parámetros del modelo. Si bien se puede observar que el modelo requiere un importante número de parámetros, en todos los casos los parámetros tienen un significado físico claro. Su deducción resulta de ensayos que no presentan una excesiva complejidad.

10.2.3.3 Capacidades del modelo y comparación con el comportamiento real

El modelo utilizado ha sido capaz de reproducir la mayoría de los aspectos del comportamiento hidromecánico del material. Resultan particularmente interesantes los resultados obtenidos en la modelación de ensayos realizados aplicando idénticas trayectorias de tensiones, pero utilizando distintas técnicas y velocidades de mojado (Figuras 8.3 y 8.6 y Figuras 8.15 y 8.18). En estos casos, el modelo permite reproducir de forma consistente los aspectos fundamentales de los comportamientos observados. Utilizando un único conjunto de parámetros para el material se reproducen los resultados obtenidos con técnicas experimentales y condiciones de contorno diferentes.

10.3 Líneas de trabajo futuro

Existe muy poca o casi nula información acerca del comportamiento hidro-mecánico de materiales formados a partir de pellets de bentonita compactada. El trabajo de investigación presentado se ha orientado a la búsqueda e identificación de los procedimientos más adecuados para caracterizar la respuesta de un material novedoso. Esta búsqueda se ha realizado siguiendo un procedimiento de ensayo y error, y ha implicado la repetición y modificación de numerosos procedimientos y técnicas de ensayo. Como en todo trabajo de investigación, la búsqueda de una respuesta a la pregunta inicial nos propone, de forma ineludible, el planteo de nuevas preguntas.

A modo de reflexión sobre los trabajos realizados, se realizan algunos comentarios y propuestas sobre las posibles líneas de trabajo futuro.

10.3.1 Técnicas y equipos de ensayo

A lo largo de esta investigación se han utilizado diversas técnicas experimentales, equipos y dispositivos de ensayo. En lo que se refiere a las perspectivas que nos ofrece la utilización de los procedimientos y equipos de ensayo desarrollados en esta investigación, es posible plantear algunas sugerencias:

- Ajustar los procedimientos de ensayo en función de las condiciones reales de utilización del material. Esto requiere estudiar de forma precisa las condiciones en las que se utilizará el material, la accesibilidad al agua y las condiciones de contorno aplicadas.
- Realizar ensayos en los que se consideren los siguientes efectos: minimizar la anisotropía provocada por la utilización de una compactación estática unidimensional y considerar la curva granulométrica lo más cercana posible a las condiciones del material en el ensayo a escala real (minimizando los efectos de escala)
- Mejorar la instrumentación del dispositivo utilizado en el ensayo de columna de infiltración. Colocar sensores de medida de la humedad relativa lo más cercanos posibles a las células de presión total. Cambiar la posición de la célula de medida de la tensión vertical y colocarla de forma opuesta al frente de inyección. Esto último permite minimizar las variaciones en la medida, provocadas por los

ajustes en la presión de inyección que realiza el equipo automático de control de presión y volumen.

10.3.2 Estudios experimentales

La mayoría de los resultados reportados en la literatura sobre materiales expansivos se han obtenido en ensayos en los que únicamente se controla la evolución de la tensión vertical. Este hecho resulta una limitante a la hora de analizar los resultados obtenidos y extender el comportamiento para el caso de un estado más general de tensiones. En respuesta a esta limitante, resultaría interesante realizar un mayor número de ensayos con un mejor control del estado de tensiones. Ensayos en edómetros con control de la tensión lateral y ensayos triaxiales.

De forma complementaria a los trabajos de laboratorio realizados y para analizar la representatividad de los resultados obtenidos, se propone el análisis y control del material en las condiciones *in situ*. Esta tarea involucra de alguna manera el desmantelamiento del ensayo a escala real y el análisis de distintas muestras de material ubicadas en distintas posiciones de la barrera.

Centrar el estudio en la realización de un mayor número de ensayos a mediana escala. Estos ensayos permiten reproducir de una forma mucho más real, las condiciones de utilización del material en una barrera de ingeniería, ya que permiten evaluar la influencia de las condiciones de contorno en forma más efectiva y minimizan los efectos de escala.

10.3.3 Estudios constitutivos

En la tesis presentada se implementó un modelo constitutivo en condiciones unidimensionales. Se implementó en un código numérico utilizando la técnica de las diferencias finitas y se utilizó para reproducir algunos resultados experimentales. A modo de continuación con estos trabajos se plantean dos posibles tareas:

- La implementación en el modelo para el caso acoplado de las funciones de interacción entre procesos de mojado y la superficie de fluencia de carga y colapso y su aplicación a los casos realizados. Estas funciones permiten considerar el fenómeno de invasión de poros.

- Aplicar el modelo constitutivo planteado para el caso de los ensayos de columna de infiltración. Esto requiere plantear las ecuaciones en condiciones de simetría radial y realizar su implementación. Sin dudas su extensión a caso de nuevas geometrías resulta indispensable para extender su aplicación a los casos reales.