

## RESUMEN

**Título: Modelación Numérica de Flujo de Fluidos y Transporte de Partículas en una Fractura de Roca Rugosa Durante Cortante**

**Autor: Víctor Vilarrasa Riaño**

**Tutores: Tomofumi Koyama y Eduardo Alonso**

El almacenaje de residuos nucleares de alta radioactividad es actualmente un asunto de crucial importancia medioambiental a nivel internacional. La solución más apropiada para el almacenaje de este tipo de residuos nucleares parece venir dado por depósitos situados a gran profundidad. Cuando se procede a la excavación de los túneles de almacenaje en un macizo rocoso fracturado, se produce una redistribución de las tensiones *in situ*, lo que provoca deformaciones significativas, tales como la apertura o cierre de fracturas ocasionadas por las variaciones de las tensiones normal y de cortante, que consecuentemente cambian las características de flujo y transporte de las fracturas y el macizo rocoso. Las modelaciones numéricas del flujo y el transporte de soluto realizadas hasta el momento usan principalmente métodos geoestadísticos basados en una distribución de densidad de probabilidad de la apertura de la fractura y en una longitud de correlación espacial específica para generar las distribuciones de aperturas de la fractura, sosteniendo que debido a la rugosidad de la fractura, el flujo aparece siguiendo algunos caminos o canales predominantes, que son los que ofrecen la menor resistencia, pero sin considerar los efectos del esfuerzo cortante. Este estudio se centra en los efectos de diferentes condiciones de contorno (algunas de las cuales no se pueden reproducir satisfactoriamente en el laboratorio, como por ejemplo el flujo unidireccional perpendicular a la dirección del cortante) y la combinación de los procesos de corte con el flujo de fluidos y el transporte de partículas, que no ha sido realizado con anterioridad. Esta investigación, por lo tanto, representa una excelente oportunidad para obtener nuevos descubrimientos en el comportamiento del flujo y el transporte de partículas en una fractura rugosa bajo procesos acoplados hidromecánicos.

Los efectos del cortante translacional y rotacional en el transporte de partículas bajo condiciones acopladas de cortante y flujo en una fractura rocosa rugosa fueron investigados numéricamente en esta tesis. Un par de superficies digitalizadas de una réplica de hormigón de una fractura rugosa de 250x250 mm fueron numéricamente manipuladas para simular los procesos de corte translacional y rotacional de la muestra, sin considerar carga normal ni degradación de las asperezas, utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF). De las evoluciones de las distribuciones de la apertura durante los procesos de corte, fueron determinadas las evoluciones de los campos de transmisividad de la fractura. Fueron consideradas diferentes simulaciones de flujo de fluido. Para el cortante translacional, tomando un intervalo de desplazamiento de corte de 1 mm, y con un desplazamiento de corte de hasta 20 mm, se han tenido en cuenta tres patrones de flujo diferentes – unidireccional (flujo paralelo y perpendicular a la dirección de corte), bidireccional y radial –. Para el cortante rotacional, con un intervalo de ángulo de corte de  $0.5^\circ$ , solo el patrón de flujo radial ha sido considerado hasta  $10^\circ$ . Además, el efecto de la rugosidad de la superficie de la fractura en los campos de apertura y transmisividad fueron evaluados usando semi-variogramas.

Los resultados del enfoque geoestadístico muestran que el cortante translacional genera un efecto significativo de acanalamiento perpendicular a la dirección de corte, que provoca una anisotropía inducida por el cortante en las distribuciones de apertura y transmisividad. El cortante rotacional induce un campo de transmisividad isotrópico con una elevada correlación en todas las direcciones. Los resultados de las simulaciones del flujo y del transporte de partículas muestran que los procesos de corte producen un gran aumento de la permeabilidad en las fracturas rugosas, conllevando paralelamente una disminución significativa en el tiempo de recorrido de las partículas, especialmente al inicio de los procesos de corte. El cortante translacional produce un efecto de acanalamiento en la dirección perpendicular a la dirección de corte, creando canales de alta transmisividad por los cuales las partículas que viajan en esta dirección pueden llegar a su destino con rapidez y sin ser objeto de retrasos por atravesar áreas de baja transmisividad, como sucede cuando el flujo fluye paralelo a la dirección de corte. Los patrones de flujo bidireccional muestran claramente los inconvenientes de los ensayos convencionales de corte y flujo con flujo unidireccional realizados en el laboratorio. En los patrones de flujo radial, mientras el cortante translacional genera un comportamiento anisotrópico del transporte de partículas con un transporte más rápido en la dirección perpendicular a la dirección de corte, el cortante rotacional presenta un campo de flujo y unos caminos de las partículas isotrópicos en todas las direcciones. Las simulaciones de flujo y transporte de partículas estudiadas proporcionan un primer paso hacia un mejor entendimiento del transporte de partículas en los procesos acoplados hidromecánicos.