

# UNIVERSIDAD DE BURGOS

## ESCUELA DE DOCTORADO

### TESIS DOCTORALES

- TÍTULO:** IMPROVED ENGINEERING SOLUTIONS FOR THERMAL DESIGN OF ARTIFICIAL GROUND FREEZING
- AUTOR:** SANCHO CALDERÓN, DIEGO
- PROGRAMA DE DOCTORADO:** TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES E INGENIERÍA CIVIL
- ACTO Y FECHA DE LECTURA:** EL ACTO PÚBLICO DE DEFENSA DE TESIS SE DESARROLLARÁ, DE MANERA PRESENCIAL, EL DÍA 06 DE OCTUBRE DE 2022, A LAS 9:00 H, EN EL AULA 11-12 DE LA ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR (CAMPUS DE LA MILANERA), DE LA UNIVERSIDAD DE BURGOS, Y MEDIANTE VIDEOCONFERENCIA, A TRAVÉS DE LA APLICACIÓN MICROSOFT TEAMS.
- DIRECTORES:** D. SERGIO JORGE IBÁÑEZ GARCÍA  
D. SANTIAGO ORTIZ PALACIO  
D. SVEN BOCK
- TRIBUNAL:** D. LUIS MARÍA GARCÍA CASTILLO  
DÑA. ANA BELÉN ESPINOSA GONZÁLEZ  
D. MARCOS ARROYO ÁLVAREZ DE TOLEDO  
D. JOSÉ MIGUEL GALERA FERNÁNDEZ  
D. JORGE CASTRO GONZÁLEZ
- RESUMEN:** La congelación artificial del terreno es un método que se utiliza habitualmente en excavaciones en terrenos acuíferos con el fin de estabilizarlos y evitar la entrada de agua subterránea. Para diseñar esta medida de mejora del terreno es necesario realizar cálculos térmicos, de los cuales se derivan el tiempo necesario hasta alcanzar el espesor de pared congelada, la requerida potencia de las máquinas de congelación y el consumo energético. Actualmente existen dos métodos principales para estos cálculos: analítico y numérico.
- Los problemas térmicos con cambio de fase pueden describirse matemáticamente mediante ecuaciones diferenciales en derivadas parciales con frontera móvil, que representan los llamados problemas de Stefan. La complejidad de estos problemas es tal que, a pesar de la intensiva investigación en este campo, solamente se conocen soluciones exactas para unos pocos de estos problemas. Estas soluciones son aplicables normalmente sólo para problemas con condiciones muy específicas, como el conocido problema de Neumann. Así, el ingeniero de diseño de proyectos de congelación artificial tiene que recurrir a soluciones aproximadas para el diseño térmico, ya sean analíticas o numéricas.
- Cuando se utilizan métodos numéricos, debido a su propia naturaleza, es necesario verificarlos y calibrarlos para limitar y controlar los errores en los resultados. En esta tesis, se han verificado varios modelos numéricos para el cálculo térmico comparándolos con la solución exacta de

Neumann. Este proceso se ha realizado mediante un análisis en profundidad de los efectos de diferentes parámetros numéricos, como el tamaño y tipo de malla, la duración de los pasos de tiempo, la frecuencia de actualización del estado de congelación de los elementos y el tipo de método de resolución (implícito o explícito). Adicionalmente, se ha realizado un análisis de sensibilidad sobre las condiciones iniciales y de contorno del problema, como el gradiente de temperatura inicial, la cantidad de calor latente, el tipo de cambio de fase (abrupto o suave) y las características térmicas del terreno. De este modo, se ha tratado de hallar los límites de aplicabilidad del modelo numérico, encontrando las condiciones que hacen que el modelo sea preciso. Con el fin de condensar los resultados de estas investigaciones, se ha creado un código de buenas prácticas para la modelación numérica de problemas térmicos con cambio de fase.

Además de los modelos numéricos, se han estudiado algunas soluciones aproximadas para el diseño ingenieril. Estas soluciones son aplicables a tres configuraciones habituales de tuberías de congelación: tubería aislada, tuberías en fila (pared congelada) y tuberías en círculo (círculo de congelación). La precisión de las soluciones analíticas aproximadas de Leibenson, Khakimov, Ständer, Sanger & Sayles y Lunardini ha sido investigada comparando sus resultados con los del modelo numérico previamente verificado. Esta comparación se ha realizado para varios problemas con diferentes condiciones iniciales y de contorno, de forma similar a los análisis de sensibilidad para la verificación del modelo numérico. Los valores de estos parámetros han sido elegidos para cubrir casos habituales y potenciales en proyectos de ingeniería. Se ha concluido que la solución de Ständer es la más precisa para la mayoría de los problemas, especialmente para la tubería aislada y tuberías en fila, aunque sin embargo, según la bibliografía, esta solución no parece ser ampliamente conocida. Una desventaja de la solución de Ständer es que no se presenta en forma de fórmula cerrada, de manera que su uso es más complicado que otras fórmulas. Por ello, se ha tratado de crear una solución que sea a la vez fácil de usar y precisa. A tal fin, se ha ajustado la fórmula de Sanger & Sayles basándose en los resultados del modelo numérico verificado, con resultados positivos.

Finalmente, datos experimentales y de proyectos de diferentes fuentes bibliográficas se han utilizado para confirmar la utilidad de las soluciones numéricas y analíticas. Los datos empíricos y los resultados de los cálculos concuerdan suficientemente, aportando evidencia adicional sobre la utilidad de los métodos empleados y reforzando las conclusiones de la tesis.

**Palabras clave:** congelación artificial de terreno, diseño térmico, problema de Stefan, solución analítica, modelación numérica.

**Keywords:** artificial ground freezing, thermal design, Stefan problem, analytical solution, numerical modelling.