

Tabla de Contenido

| | |
|---|-----------|
| Introducción | 1 |
| 1. Preliminares | 5 |
| 1.1. Descripción del movimiento de un fluido | 5 |
| 1.1.1. Descripción Lagrangiana | 5 |
| 1.1.2. Descripción Euleriana | 6 |
| 1.2. Teorema de Transporte | 9 |
| 1.2.1. Transporte de Masa | 10 |
| 1.2.2. Conservación de Momentum | 11 |
| 1.3. Fluidos de Bingham | 12 |
| 1.4. Una expresión para δ diámetro de los tubos | 21 |
| 1.5. Algoritmo | 23 |
| 2. Tiempos de cálculo de una simulación | 27 |
| 2.1. Parámetros | 27 |
| 2.2. Experimento para $dt = 0.001$ | 28 |
| 2.2.1. Comparando fronteras | 28 |
| 2.2.2. Tiempo de cálculo vs tiempo de simulación | 31 |
| 2.3. Experimento para $dt = 0.005$ | 34 |
| 2.3.1. Comparando fronteras | 34 |
| 2.3.2. Tiempo de cálculo vs tiempo de simulación | 37 |
| 2.4. Comparación con la Complejidad | 40 |
| 3. Estudio de carga hidráulica para distintos mallados | 43 |
| 3.1. Parámetros usados | 43 |
| 3.2. Resultados numéricos | 44 |
| 4. Modelo comparado con datos experimentales | 48 |
| 4.1. Parámetros | 48 |
| 4.2. Resultados numéricos | 50 |
| 5. Caso Newtoniano | 54 |
| 5.1. Flujo estacionario para tiempos cercanos a 0 | 54 |
| 5.2. Experimentos | 56 |
| 5.2.1. Dominio rectangular con desagüe | 57 |
| 5.2.2. Dominio Rectangular con drenaje | 58 |
| 5.2.3. Dominio rectangular con un trozo de muralla impermeable, y con desagüe | 60 |

| | |
|---|-----------|
| 6. Caso Estacionario | 62 |
| 6.1. Resultado Teórico | 62 |
| 6.2. Caso muro vertical | 65 |
| 6.2.1. Resultados Numéricos | 65 |
| 6.3. Caso muro no vertical | 69 |
| 6.3.1. Resultados Numéricos | 70 |
| 7. Aplicación: Tranque de relave sobre fondo poroso horizontal | 74 |
| 7.1. Contexto | 74 |
| 7.2. Aproximación unidimensional del problema | 75 |
| 7.3. Modelo | 76 |
| 7.4. Parámetros a utilizar | 76 |
| 7.5. Experimentos | 76 |
| 7.6. Conclusiones | 79 |
| 8. Manual de Usuario | 80 |
| 8.1. Generar Nodos, Tubos y Geometría | 83 |
| 8.2. Calcular posición del llenado | 84 |
| 8.3. Cálculo de llenado según caudal | 84 |
| 8.4. Función de caudal | 85 |
| 8.5. Función Conservación de Flujo | 85 |
| 8.6. Cálculo de Caudal para Tubo Lleno | 86 |
| 8.7. Cálculo de Caudal para Tubo Semilleno | 86 |
| 8.8. Algoritmo de Newton | 87 |
| Conclusión | 88 |
| Bibliografía | 91 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| 2.1. Parámetros de la simulación. | 27 |
| 2.2. Tiempos de cálculo del algoritmo de Newton y del total del programa, con $dt = 0.001s$ | 31 |
| 2.3. Tiempos de cálculo del algoritmo de Newton y del total del programa, con $dt = 0.005s$ | 37 |
| 2.4. Tiempos para medir complejidad con $dt = 0.001$ | 41 |
| 2.5. Cociente entre tiempos de cálculo para distintos tamaños de malla | 41 |
| 2.6. Tiempos para medir complejidad con $dt = 0.005$ | 41 |
| 2.7. Cociente entre tiempos de cálculo para distintos tamaños de malla con $dt = 0.005$ | 41 |
| 3.1. Parámetros del experimento para calcular cargas. | 43 |
| 4.1. Parámetros de los experimentos | 49 |
| 4.2. Parámetros de porosidad, esfericidad y diámetro medio de los tubos para cada experimento | 49 |
| 5.1. Parámetros del experimento con desagüe | 57 |
| 6.1. Distintos parámetros de porosidad para estudiar el caso estacionario. | 65 |
| 6.2. Parámetros de la simulación, caso estacionario. | 71 |
| 7.1. Parámetros del experimento: Caso borde superior | 76 |
| 7.2. Listado de parámetros dispuestos para cada experimento. | 77 |

Índice de Ilustraciones

| | |
|---|----|
| 1.1. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 1s$ | 24 |
| 1.2. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 10s$ | 24 |
| 1.3. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 20s$ | 25 |
| 1.4. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 25s$ | 25 |
| 1.5. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 25.8s$ | 25 |
| 1.6. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 30.9s$ | 26 |
| 1.7. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 32.3s$ | 26 |
| 1.8. Ejemplo del algoritmo, instante $t = 33.8s$ | 26 |
| | |
| 2.1. Frontera en una malla de 10×10 usando $dt = 0.001s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$, | 28 |
| 2.2. Frontera en una malla de 15×15 usando $dt = 0.001s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 28 |
| 2.3. Frontera en una malla de 20×20 usando $dt = 0.001s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 29 |
| 2.4. Frontera en una malla de 25×25 usando $dt = 0.001s$ para tiempos de simulación $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 29 |
| 2.5. Frontera en una malla de 30×30 usando $dt = 0.001s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 30 |
| 2.6. Frontera para distintas mallas en un tiempo de simulación $T = 1.6s$, con $dt = 0.001s$ | 30 |
| 2.7. Gráfico de la zona mojada en función del tiempo de simulación, para distintas mallas, con $dt = 0.001$ | 32 |
| 2.8. Gráfico loglog de los tiempos de cálculo en función de distintos tiempos de simulación $T = 0.1, 0.2, 0.4, 0.8$ y $1.6s$, con $dt = 0.001s$ | 32 |
| 2.9. Ajuste lineal de los tiempos de cálculo en escala logarítmica. $T = 0.1, 0.2, 0.4, 0.8$ y $1.6s$, con $dt = 0.001s$ | 33 |
| 2.10. Frontera en una malla de 10×10 usando $dt = 0.005s$ para tiempos de simulación $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 34 |
| 2.11. Frontera en una malla de 15×15 usando $dt = 0.005s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 35 |
| 2.12. Frontera en una malla de 20×20 usando $dt = 0.005s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 35 |
| 2.13. Frontera en una malla de 25×25 usando $dt = 0.005s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 36 |
| 2.14. Frontera en una malla de 30×30 usando $dt = 0.005s$ para tiempos de simulación (de izquierda a derecha) $T = 0.5, 1.0$ y $1.5s$ | 36 |

| | |
|---|----|
| 2.15. Frontera para distintas mallas en un tiempo de simulación $T = 1.6s$, con $dt = 0.005s$ | 37 |
| 2.16. Gráfico de la zona mojada en función del tiempo de simulación, para distintas mallas, con $dt = 0.005s$ | 38 |
| 2.17. Gráfico loglog de los tiempos de cálculo en función de distintos tiempos de simulación $T = 0.1, 0.2, 0.4, 0.8$ y $1.6s$, con $dt = 0.005s$ | 39 |
| 2.18. Ajuste lineal de los tiempos de cálculo en escala logarítmica. $T = 0.1, 0.2, 0.4, 0.8$ y $1.6s$, con $dt = 0.005s$ | 40 |
| 3.1. Distintas mallas usadas en el experimento | 44 |
| 3.2. Evolución de las cargas hidráulicas en distintos instantes en una malla de 10×10 | 45 |
| 3.3. Evolución de las cargas hidráulicas en distintos instantes en una malla de 19×19 | 45 |
| 3.4. Evolución de las cargas hidráulicas en distintos instantes en una malla de 37×37 | 46 |
| 3.5. Evolución en el tiempo de las cargas hidráulicas en la malla de 19×19 de los nodos cuya posición coincide con los nodos de la malla de 10×10 | 46 |
| 3.6. Evolución en el tiempo de las cargas hidráulicas en la malla de 37×37 de los nodos cuya posición coincide con los nodos de la malla de 10×10 | 46 |
| 3.7. Gráfico de la norma de las diferencias | 47 |
| 5.1. Tubo con nodo en el borde izquierdo del dominio. | 54 |
| 6.10. Condición para que el teorema pueda cumplirse | 69 |
| 7.1. Visualización del problema. El sistema de referencia se ubica en el borde superior del dominio. | 74 |
| 7.2. Caso unidimensional | 75 |
| 7.3. Promedio de la altura para distintos casos, $l = 2$ | 77 |
| 7.4. Promedio de la altura para distintos casos, $l = 4$ | 78 |
| 7.5. Gráfico del promedio de las alturas del llenado en función del tiempo, para $\tau^* = 2.162$ | 79 |