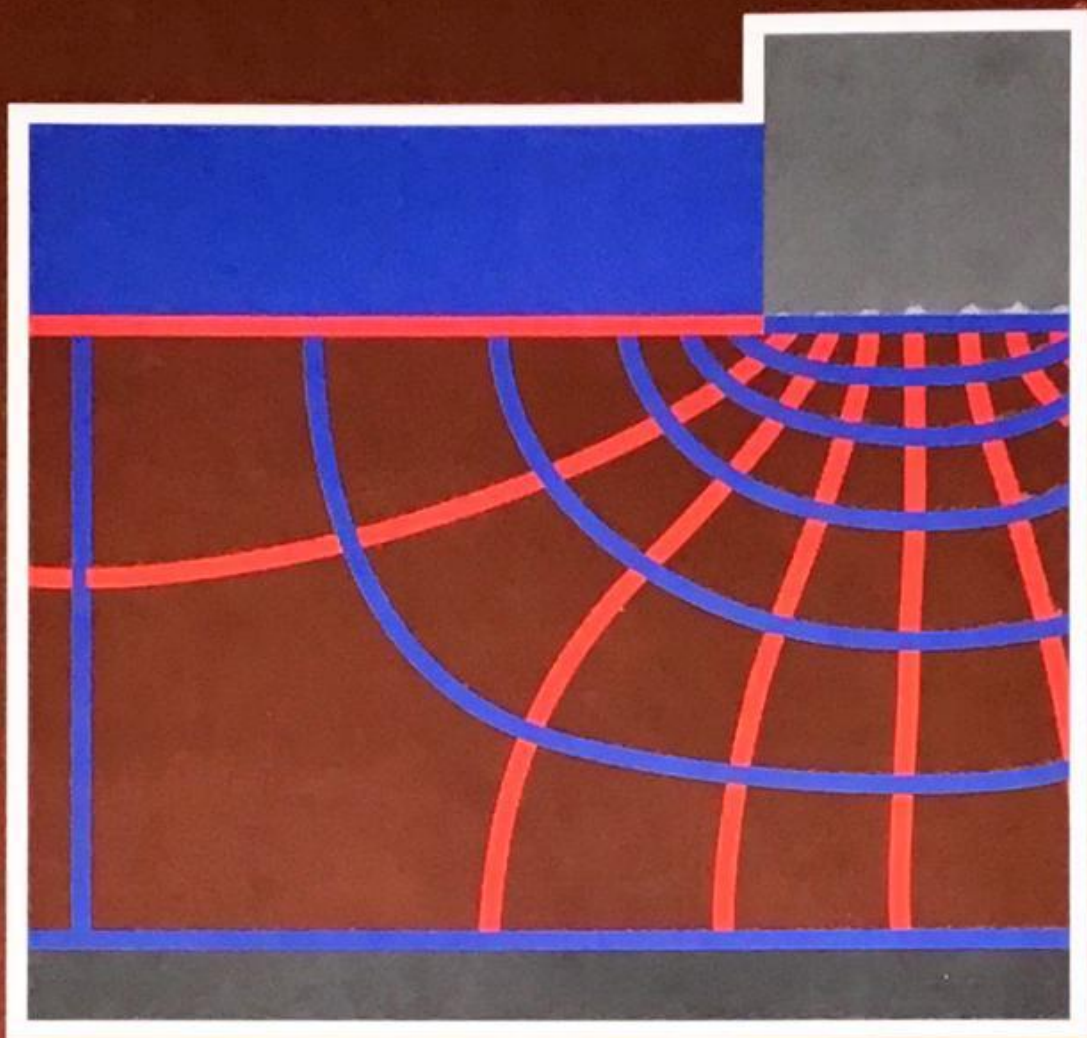


**INTRODUCCIÓN AL
FLUJO DE AGUA
EN SUELOS**



ABIMAEEL CRUZ ALAVEZ

Comprender plenamente los conceptos de conocimiento en una disciplina científica es de fundamental importancia, pues de ello depende un buen diagnóstico y un adecuado planteamiento de los problemas, lo cual conduce a soluciones óptimas. Por ello, el autor de esta obra desde su inicio plantea una definición actualizada del suelo y las características de cada una de las fases que lo constituyen, ocupando importancia sobresaliente la fase líquida constituida principalmente por agua. De ésta, la que se encuentra en condiciones de viscosidad normal, identificada como agua libre, es la que puede circular a través de las oquedades del suelo y la que da origen al flujo de agua.

Los efectos del flujo de agua en suelos se traducen en alteración de las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante, en fuerzas de arrastre de las partículas sólidas, en fuerzas de subpresión en estructuras impermeables, en fugas de agua de almacenamientos, en aportaciones de agua de acuíferos y en la contaminación de éstos por actividades humanas. Se manifiesta

en fallas catastróficas de grandes masas de suelo, en deterioro ecológico de extensas zonas por hundimientos, contaminación, agrietamientos y sequías, sólo por mencionar algunas de las consecuencias que afloran y que señalan la importancia del estudio y comprensión del fenómeno.

Es frecuente que las soluciones de los diversos problemas de flujo de agua en suelos respondan a una experiencia previa, aunque, también con frecuencia, se basan en recetas empíricas muchas veces fuera de contexto y que por lo mismo conducen a fracasos, y en el mejor de los casos a soluciones costosas, debido a que no se comprende adecuadamente el problema.

Esta obra, que ofrece aportaciones originales en varias de sus partes, presenta las bases fundamentales del flujo de agua en suelos que conducen a la comprensión del fenómeno y, con ello, el ingeniero geotécnico es capaz de plantear y aplicar soluciones adecuadas a los problemas que se le presentan.

ABIMAE CRUZ ALAVEZ, originario de Jayacatlán, Etlá, Oaxaca, es ingeniero civil con maestría en Ciencias en Mecánica de Suelos por la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional de México. Cuenta con amplia experiencia en geotecnia, al haber participado en el diseño y la supervisión de la construcción de más de 50 presas de diversos tipos en la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos de 1979 a 1985. En la Comisión Federal de Electricidad, de 1986 a la fecha de publicación de este texto, ha diseñado estructuras y cimentaciones de subestaciones y líneas de transmisión de energía eléctrica de alta tensión; fue subgerente de Diseño de esas mismas disciplinas y participó en el diseño y elaboración de especificaciones, en la integración de bases de licitación, la evaluación de propuestas y en la supervisión de la construcción del Proyecto Hidroeléctrico Leonardo Rodríguez Alcaine (El Cajón).

Con 30 años de ejercicio de la docencia en el posgrado de Ingeniería Civil en la ESIA del IPN, ha dirigido diez tesis de grado y obtuvo el premio como director de la mejor tesis (1994-1995). Ha dictado conferencias en instituciones mexicanas y publicado 13 artículos técnicos en diversos medios.

Es miembro de la Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos y del Colegio de Ingenieros Civiles de México, donde ha sido codirector de Prestaciones y Seguridad Social (1993-1994), vocal del XXVI Consejo Directivo (1996-1998), secretario del Consejo Académico (1996-1998), vicepresidente del XXVII Consejo Directivo (1998-2000) y presidente del Consejo Académico (1998-2000). Desde 2002 es integrante del Grupo Visión 2025 (actualmente Visión 2030) del CICM.



PRÓLOGO

Llegar a treinta años de ejercicio profesional y docente ha sido de lo más satisfactorio de la vida para el autor de este libro. A lo largo de ese periodo, ha afirmado y aprendido lo suficiente de la profesión de ingeniero civil y de los jóvenes estudiantes, muchos con altas aspiraciones y gran entusiasmo para apropiarse del conocimiento y enfrentar la vida con éxito, a ellos va dirigido este libro, con el deseo ferviente de que les sea útil en la introducción al conocimiento del comportamiento del agua cuando circula dentro de las masas de suelo.

Es cierto que ya se han publicado muy buenos libros sobre este tema; sin embargo, todavía existen ciertos temas elementales que no han sido debidamente remarcados para estudios más profundos y, por lo mismo, el flujo de agua en suelos sigue siendo una disciplina de la geotecnia difícil de manejar. El libro no tiene más altas pretensiones que las de presentar las bases fundamentales de este tema, para una mayor comprensión de los problemas que se generan por este concepto, por ello se eligió el nombre de Introducción al flujo de agua en suelos.

Diez años diseñando y supervisando la construcción de presas de tierra y enrocamiento en la antigua Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos y veinte años en la Comisión Federal de Electricidad de México han sido muy fértiles en la experiencia profesional del autor para la comprensión de los problemas reales con los que se enfrenta un ingeniero civil, y que al verse en la docencia hacen posible un libro como el que ahora se encuentra en las manos del lector.

Los efectos del agua que circula a través de las masas de suelo se traduce en alteración de las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante, en fuerzas de arrastre de las partículas sólidas, en fuerzas de subpresión en estructuras impermeables, en fugas de agua de almacenamientos, en aportaciones de agua de acuíferos y en la contaminación de éstos por las actividades humanas. Se manifiesta en fallas catastróficas de grandes masas de suelo, en deterioro ecológico de extensas zonas por hundimientos; en contaminación, agrietamientos y sequías, sólo por mencionar algunas de las consecuencias que afloran y que señalan la importancia del estudio y comprensión del fenómeno. Es responsabilidad del ingeniero civil resolver y prever estos problemas durante el desarrollo y diseño de los proyectos, para evitar pérdidas futuras, económicas y humanas, por riesgos geológicos, estructurales y ecológicos, pues tiene una aplicación directa en el diseño, construcción y operación de todo tipo de presas de almacenamiento de agua, en edificaciones en general, en carreteras y aeropuertos, en rellenos sanitarios, en el aprovechamiento óptimo y racional de acuíferos, en la recarga de éstos, en la predicción y prevención de deslizamiento de laderas, hundimientos y agrietamientos o fallas regionales del subsuelo.

La estructura y el contenido del libro responden a un curso de posgrado en Geotecnia, específicamente el que se imparte en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura del Instituto Politécnico Nacional de México, donde el autor ha ejercido la docencia.

El enfoque se ha centrado en los temas básicos y generales, por lo que, para temas más específicos y de mayor profundidad, el estudiante deberá remitirse a artículos publicados en revistas especializadas o a libros más avanzados, estos últimos no escritos en idioma español.

El lector encontrará aportaciones originales del autor en diversas partes del libro. En el capítulo 1, la definición de suelo surge de la reflexión sobre la estructura y el comportamiento de este material. En el capítulo 2, encontrará una expresión matemática para determinar en forma aproximada el coeficiente de permeabilidad de suelos granulares que mejora la propuesta por Hazen, y en el capítulo 9, dentro del concepto de gradientes hidráulicos críticos, se propone un procedimiento para determinar éstos en cualquier tipo de suelo en función del peso volumétrico (γ), cohesión (c) y ángulo de fricción interna (ϕ) para el caso de una tablestaca, mismo que se puede extender a cualquier tipo de estructura o problema de flujo de agua.

Si esta obra es capaz de proporcionar los fundamentos necesarios al ingeniero geotécnico para entender y realizar su tarea de resolver y prever los problemas de flujo de agua en suelos, habrá cumplido su objetivo.

Como cualquier obra humana, este libro no está exento de errores o equivocaciones y, de existir, el autor asume toda la responsabilidad y anticipadamente agradece la comprensión y colaboración del lector para el mejoramiento futuro.

Abimael Cruz Alavez
Marzo, 2008.

CONTENIDO

PRÓLOGO	13
1. CONCEPTOS BÁSICOS	15
1.1 INTRODUCCIÓN	15
1.2 EL SUELO	15
1.3 FASES QUE CONSTITUYEN EL SUELO	16
1.3.1 Fase sólida	16
1.3.2 Fase líquida	17
1.3.2.1 Agua adsorbida	17
1.3.2.2 Agua capilar	17
1.3.2.3 Agua libre	18
1.3.3 Gases	18
2. PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS SUELOS	19
2.1 CONCEPTOS GENERALES DE HIDRÁULICA	19
2.1.1 Ley de conservación de la energía y ecuación de Bernoulli	19
2.1.2 Ecuación del gasto en régimen establecido o de continuidad	20
2.2 POTENCIAL HIDRÁULICO	21
2.3 GRADIENTE HIDRÁULICO	21
2.4 RELACIÓN DE i CON LA VELOCIDAD EN RÉGIMEN LAMINAR Y TURBULENTO	22
2.5 NÚMERO DE REYNOLDS	23
2.6 VELOCIDAD DE DESCARGA Y VELOCIDAD DE FLUJO EN LAS MASAS DE SUELO	24
2.7 LEY DE DARCY Y COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD	25
3. ECUACIÓN MATEMÁTICA Y SOLUCIÓN GRÁFICA DEL FLUJO DE AGUA EN SUELOS	29
3.1 FLUJO ESTABLECIDO Y FLUJO NO ESTABLECIDO	29
3.2 ECUACIONES HIDRODINÁMICAS EN LOS SUELOS	30
3.3 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DE LAPLACE	34
3.4 RED DE FLUJO. MÉTODO GRÁFICO	36
3.5 TRAZO DE REDES DE FLUJO	37
3.5.1 Reglas prácticas para el trazo de las redes de flujo	39
3.5.2 Cuadros y puntos singulares de una red de flujo	40
4. FLUJO CONFINADO Y FLUJO NO CONFINADO	45
4.1 INTRODUCCIÓN	45
4.2 REGIONES DE FLUJO CONFINADO	45
4.3 REGIONES DE FLUJO NO CONFINADO	46
4.3.1 Características de la línea de corriente superior	47

4.3.1.1	Condiciones de entrada y salida	48
4.3.1.2	Velocidades de entrada y salida	52
4.3.2	Procedimientos teóricos para trazar la línea de corriente superior	56
4.3.2.1	Método de Dupuit	56
4.3.2.2	Parábola de Kozeny o parábola básica	59
4.3.2.3	Método de la tangente	65
4.3.2.4	Método del seno	68
4.3.3	Factor de forma de una red de flujo en regiones no confinadas	71
5.	FLUJO DE AGUA A TRAVÉS DE SECCIONES DE MÁS DE UNA PERMEABILIDAD	73
5.1	INTRODUCCIÓN	73
5.2	CONDICIONES DE TRANSFERENCIA DE UNA RED DE FLUJO EN LA FRONTERA DE DOS MEDIOS DE DIFERENTE PERMEABILIDAD	74
5.3	CONDICIONES DE TRANSFERENCIA DE LA LÍNEA DE CORRIENTE SUPERIOR EN LA FRONTERA DE DOS MEDIOS DE DIFERENTE PERMEABILIDAD	82
6.	FLUJO DE AGUA EN MEDIOS ESTRATIFICADOS Y ANISÓTROPOS	91
6.1	INTRODUCCIÓN	91
6.2	MEDIOS ANISÓTROPOS	94
6.2.1	Variación de la permeabilidad	94
6.2.2	Redes de flujo en medios anisótropos	97
7.	MÉTODOS NUMÉRICOS PARA RESOLVER PROBLEMAS DE FLUJO BIDIMENSIONAL	101
7.1	INTRODUCCIÓN	101
7.2	MÉTODO DE RELAJACIONES	101
7.3	MÉTODO DEL ELEMENTO FINITO	116
8.	FLUJO EN TRES DIMENSIONES	119
8.1	INTRODUCCIÓN	119
8.2	FLUJO A TRAVÉS DE LAS LADERAS NATURALES EN UNA CORTINA DE EMBALSE	119
9.	EFFECTOS DESTRUCTIVOS DEL FLUJO DE AGUA Y MÉTODOS CORRECTIVOS	127
9.1	INTRODUCCIÓN	127
9.2	PRESIONES HIDRODINÁMICAS	130
9.3	FUERZAS DE FILTRACIÓN	132
9.4	GRADIENTES HIDRÁULICOS CRÍTICOS	134
9.5	TUBIFICACIÓN O ARRASTRE DE PARTÍCULAS	136
9.6	FILTROS	139

10. FLUJO NO ESTABLECIDO	143
10.1 INTRODUCCIÓN	143
10.2 FLUJO NO ESTABLECIDO	143
10.3 VACIADO RÁPIDO EN CORTINAS DE EMBALSES DE MATERIAL HOMOGÉNEO	149
10.4 VACIADO RÁPIDO EN CORTINAS DE EMBALSES DE MATERIALES GRADUADOS	150
10.5 OTROS CASOS DE VACIADO RÁPIDO	152
10.6 LÍNEA DE CORRIENTE SUPERIOR EN UN TALUD EN VACIADO RÁPIDO	154
11. FLUJO DE AGUA EN POZOS	157
11.1 INTRODUCCIÓN	157
11.2 POZOS DE EXTRACCIÓN CON FLUJO ESTABLECIDO EN UN ACUÍFERO CONFINADO	158
11.3 POZO DE EXTRACCIÓN CON FLUJO ESTABLECIDO EN UN ACUÍFERO LIBRE	162
11.4 REDES DE FLUJO PARA POZOS DE EXTRACCIÓN	164
11.5 CONJUNTO DE POZOS DE BOMBEO	169
11.6 INFLUENCIA DE FUENTES EXTERNAS EN POZOS DE EXTRACCIÓN DE AGUA MÉTODO DEL POZO IMAGEN	172
11.7 FLUJO NO ESTABLECIDO EN POZOS DE BOMBEO	178
12. PIEZOMETRÍA	183
12.1 INTRODUCCIÓN	183
12.2 PIEZÓMETRO ABIERTO O TIPO CASAGRANDE	185
12.3 PIEZÓMETROS DE SISTEMAS HIDRÁULICOS CERRADOS	189
12.4 OTRO TIPO DE PIEZÓMETROS	190
12.4.1 Piezómetros eléctricos	191
12.4.2 Piezómetros neumáticos	191
12.5 SELECCIÓN DEL TIPO DE PIEZÓMETRO A INSTALAR	196
12.6 CAUSAS DE FALLA EN PIEZÓMETROS	197
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	199