

LA DISIPACION DE PRESIONES INTERSTICIALES EN ESPALDONES DE PRESAS DE TIERRA, POR MEDIO DE CAPAS DRENANTES HORIZONTALES SEMIPERMEABLES

SANTIAGO URIEL
CLAUDIO OLALLA

Laboratorio de Geotecnia (CEDEX)

RESUMEN

Cuando no se dispone de materiales claramente permeables para mantos drenantes horizontales en los espaldones de aguas arriba de presas de tierra, el uso de materiales semipermeables permite alcanzar alguna disipación de las presiones intersticiales generadas por un desembalse rápido. En tales casos, se debe tener en consideración el efecto bidimensional de los fenómenos transitorios representativos del flujo. Se ha desarrollado un programa de ordenador para resolver por el método de diferencias finitas la integración de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema. El programa ha sido utilizado con éxito para conseguir un diseño óptimo de la presa de Sube y Baja, en el Ecuador.

1. INTRODUCCION

Normalmente las presiones intersticiales residuales originadas como consecuencia de un desembalse rápido constituyen el factor más importante que condiciona la estabilidad del talud de aguas arriba de una presa de tierra o de escollera. Análogamente, en ocasiones, las presiones intersticiales existentes al final de la construcción son las determinantes de la geometría del talud de aguas abajo.

Cuando materiales claramente permeables, tales como escolleras, gravas, etc., no son económicamente disponibles para construir la totalidad del espaldón, se suele acudir a la construcción de capas drenantes horizontales conectadas con la superficie exterior del talud o con las capas de filtro de la presa, para conseguir la disipación rápida de las presiones intersticiales. Sin embargo, también hay situaciones en las cuales no es posible

poder disponer de cantidad suficiente de un material claramente permeable, y sólo se puede acudir a materiales de características intermedias, desde el punto de vista de la permeabilidad.

En estos casos, el análisis de la disipación de las presiones intersticiales no se puede realizar suponiendo que se produce exclusivamente el flujo vertical del agua hacia las capas drenantes semipermeables. Necesariamente debe ser considerado el flujo horizontal a través de estas mismas capas.

Con el objetivo de introducir este efecto, se ha codificado un programa de ordenador, CONS-2D, que resuelve la integración de las ecuaciones en derivadas parciales que rigen el fenómeno por medio del método de las diferencias finitas. Los factores principales y más significativos del proceso de disipación de las presiones intersticiales se han introducido una vez que el desembalse rápido se inicia, considerando también la variación con el tiempo del nivel del agua en el embalse.

Por este procedimiento es posible introducir en los cálculos de estabilidad del talud de aguas arriba, bajo las hipótesis de desembalse rápido, los coeficientes representativos de las presiones intersticiales residuales.

2. FORMULACION BASICA DEL PROBLEMA

Terzaghi-Frölich formuló las hipótesis matemáticas que gobiernan unidimensionalmente la disipación de las presiones intersticiales, por medio de la conocida ecuación:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{K_v E_v}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

en donde:

- u = presión intersticial,
- t = tiempo,
- K_s = coeficiente de permeabilidad del suelo, en la dirección z ,
- E_s = módulo edométrico del suelo, y
- γ_w = peso específico del agua.

Considerando las capas drenantes horizontales, la presencia del agua se rige por los efectos de variación volumétrica, dependiendo tanto de la evolución de las presiones intersticiales del agua como de la compresibilidad del dren. Los cambios del volumen del agua contenida en la unidad de longitud del elemento del drenaje, por unidad de tiempo, vienen regidos por la siguiente expresión (ver Fig. 1):

$$V = d \frac{\partial V_s}{\partial z} = V_{z,1} - V_{z,2} =$$

$$d \frac{K_d}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u_d}{\partial x^2} - \frac{K_s}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u_s}{\partial z} \right)_1 - \frac{K_s}{\gamma_w} \left(\frac{\partial u_s}{\partial z} \right)_2 \quad (2)$$

donde:

- d = espesor del dren horizontal,
- x = dirección horizontal (dirección del dren),
- K_d = coeficiente de permeabilidad del dren,
- $u_s = (u_s)_1 = (u_s)_2$ = presión intersticial del dren y del suelo, y

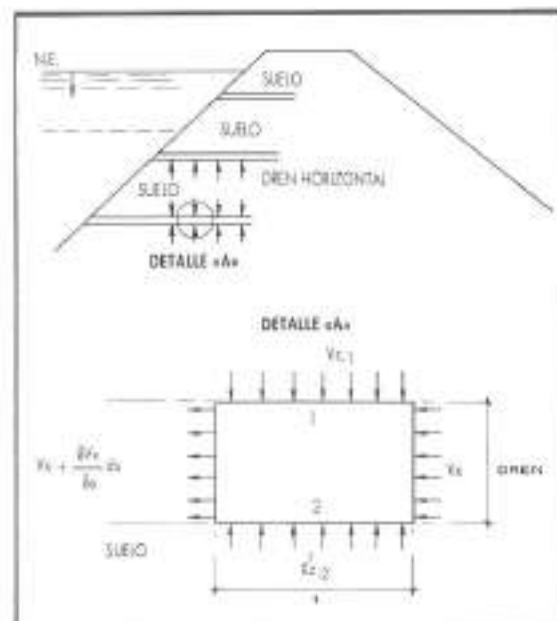


FIGURA 1. Esquema del drenaje.

$\left(\frac{\partial u_s}{\partial z} \right)_1$; $\left(\frac{\partial u_s}{\partial z} \right)_2$ = derivada parcial de la presión intersticial del agua, en los puntos 1 y 2 de contacto con el dren (ver Fig. 1).

Este volumen de agua debe ser igual a la deformación volumétrica del dren, de la siguiente manera:

$$\Delta V = \frac{\partial u_d}{\partial t} \frac{d}{E_d} \quad (3)$$

en donde:

E_d es el módulo edométrico del dren.

Como las ecuaciones (2) y (3) deben ser iguales se obtiene:

$$\frac{\partial^2 u_d}{\partial x^2} + \frac{k_d E_d}{\gamma_w} - \left(\left(\frac{\partial u_s}{\partial z} \right)_1 + \right.$$

$$\left. - \left(\frac{\partial u_s}{\partial z} \right)_2 \right) \cdot \frac{k_s E_s}{\gamma_w \cdot d} = \frac{\partial u_s}{\partial t}$$

Las ecuaciones (1) y (4) se pueden resolver por el método de las diferencias finitas (Δt , ΔU_s , ΔU_d) considerando que en los puntos de contacto entre el dren y el suelo, las presiones intersticiales deben ser idénticas ($(u_s)_1 = (u_s)_2 = u_d$).

Los valores de Δu_s e Δu_d , obtenidos mediante la resolución de las ecuaciones (1) y (4), se deben añadir a la variación de las presiones de poro producidas como consecuencia de la decompresión elástica del suelo ($\Delta u_s)_{DE}$, debida a la disminución del nivel del agua, de la siguiente manera:

$$u_{s,t} + \Delta t = u_{s,t} + \Delta u_s + (\Delta u_s)_{DE} \quad (5)$$

$$u_{d,t} + \Delta t = u_{d,t} + \Delta u_d + (\Delta u_d)_{DE} \quad (6)$$

en donde los subíndices s y d significan suelo y dren, respectivamente.

Los valores de $(\Delta u_s)_{DE}$ e $(\Delta u_d)_{DE}$ se pueden obtener mediante procedimientos simplificados, como por ejemplo, utilizando las hipótesis de Skempton (1954) que parecen ser una de las más aceptadas comúnmente. Con este método, la evolución de las presiones intersticiales en cualquier punto del espaldón de aguas arriba es igual a la variación de las presiones totales en ese mismo punto, consecuencia de la bajada del nivel freático.

3. APLICACION AL DISEÑO DE LA PRESA DE SUBE Y BAJA

La presa de Sube y Baja de 50 m de altura y 750 m de longitud se encuentra en la península de Santa Elena, en el Ecuador.

El espaldón de aguas arriba se va a construir con un material de muy baja permeabilidad. Si se deseara utilizar materiales claramente permeables, para que constituyan los mantos drenantes horizontales, sería necesario acudir a muchos kilómetros de distancia de la cerrada. Bajo estas circunstancias ha sido conveniente analizar los beneficios que se producen si se usase un material arenoso semipermeable, con un coeficiente de permeabilidad próximo a 10^{-5} cm/seg., a fin de que sea colocado en los drenes horizontales.

Basándose en cálculos de estabilidad que utilizan las teorías de equilibrio límite, se han calculado los coeficientes de seguridad frente al deslizamiento del talud de aguas arriba, para diferentes valores del porcentaje de disipación de las presiones intersticiales alcanzadas durante el proceso de desembalse rápido (ver Fig. 2).

Inicialmente se ha determinado la sensibilidad del procedimiento analítico supuesto, por medio del programa de ordenador CONS-2D, una vez que el propio programa ha sido contrastado. Para ello se ha evaluado la influencia en el resultado final de diferentes factores tales como el número de puntos de integración, el intervalo de tiempo de cálculo, los valores de las densidades supuestas, los módulos edométricos, etc.

Una vez que se ha conocido la precisión del método analítico utilizado, se ha efectuado tam-

bién un estudio paramétrico, introduciendo diferentes juegos de valores de los datos más representativos del sistema de capas de drenaje. Como consecuencia de este estudio se ha definido el parámetro «NRC» (Número Representativo del Caudal) y que es igual al producto del «número de drenes» por el «espesor del dren», (m), y por el «coeficiente de permeabilidad» del material (cm/seg). Este parámetro viene a representar la capacidad del sistema de drenaje en su conjunto.

Como primera consecuencia de este estudio, aplicado al caso concreto de la «Presa de Sube y Baja», se ha detectado la relativamente poca influencia que tiene en el resultado final la variación en los datos de entrada de:

- La velocidad de desembalse para rangos comprendidos entre 0,5 y 1 m/día.
- El coeficiente de permeabilidad del suelo, para valores comprendidos entre 10^{-6} y 5×10^{-7} cm/seg.

Se ha dibujado en la Fig. 3, la relación existente entre el «Número Representativo del Caudal» y los porcentajes, medios en todo el espaldón, calculado de disipación de las presiones intersticiales. Estas relaciones se han calculado principalmente para tres valores distintos del talud exterior; 3,75H : 1V, 4H : 1V y 4,5H : 1V.

Fruto de este estudio también se han elaborado las Figs. 4 y 5 que relacionan gráficamente, en coordenadas semilogarítmicas y naturales, respectivamente, el «Número Representativo del Caudal» (NRC) y el valor mínimo requerido del talud de aguas arriba.

Del análisis de la Fig. 5 se detecta cómo cuando el valor del NRC se incrementa por encima de 10^{-4} los beneficios que se producen en el diseño de la Presa de Sube y Baja son muy reducidos. Por el contrario, pequeñas variaciones en el NRC para rangos inferiores a 10^{-4} presentan influencias negativas decisivas.

Para este caso particular, considerando los factores involucrados y los resultados producidos, se ha seleccionado un valor de diseño de 4H : 1V, para el talud exterior del espaldón de aguas arriba. El esquema del sistema de drenaje que resulta se corresponde con un conjunto definido por 6 capas drenantes de 1 m de espesor del material arenoso semipermeable. La permeabilidad de este material se ha estimado de 10^{-5} cm/seg., basándose en resultados de los ensayos de laboratorio y de campo.

Si no se hubiese introducido este esquema de drenaje, hubiese sido necesario un talud 4,75H : 1V.

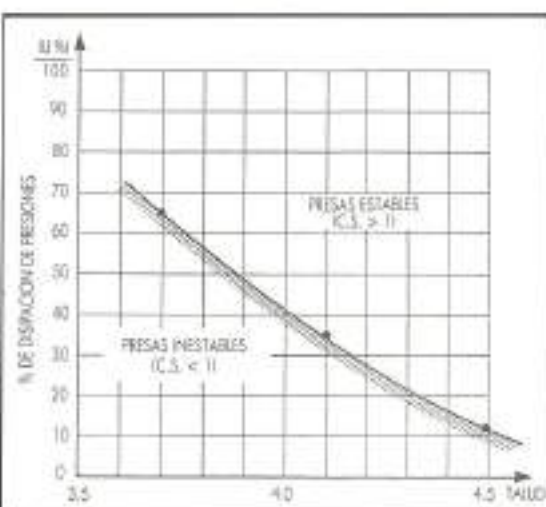


FIGURA 2. Relación entre el porcentaje de drenaje y el talud mínimo necesario.

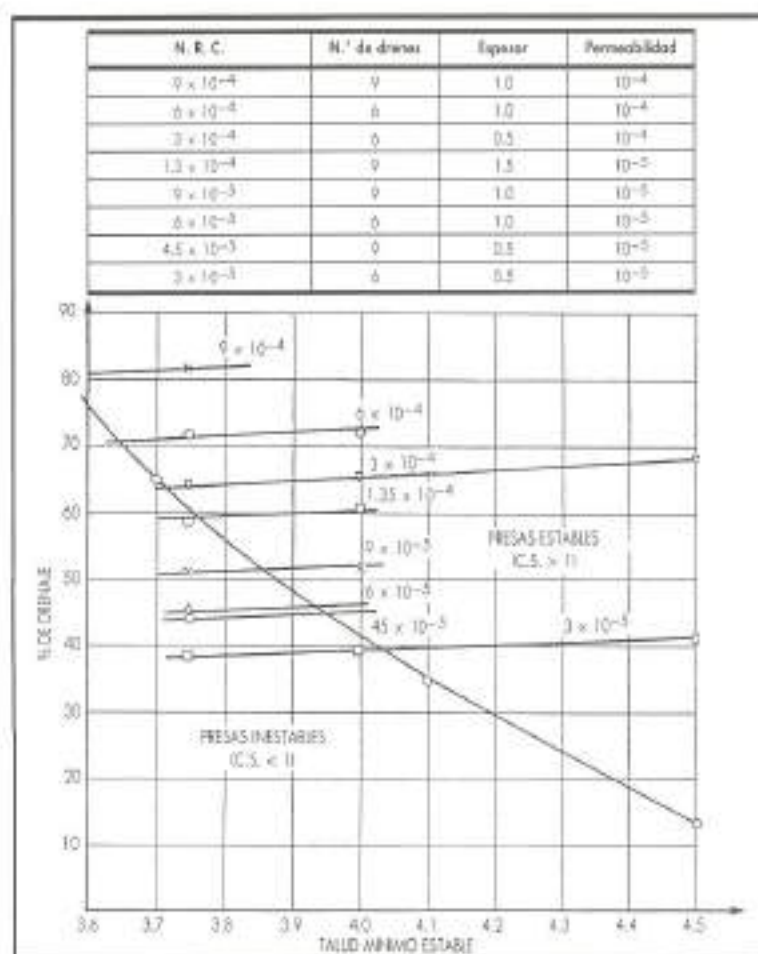


FIGURA 3. Relación entre el número representativo del canal y el porcentaje de disipación de presiones.

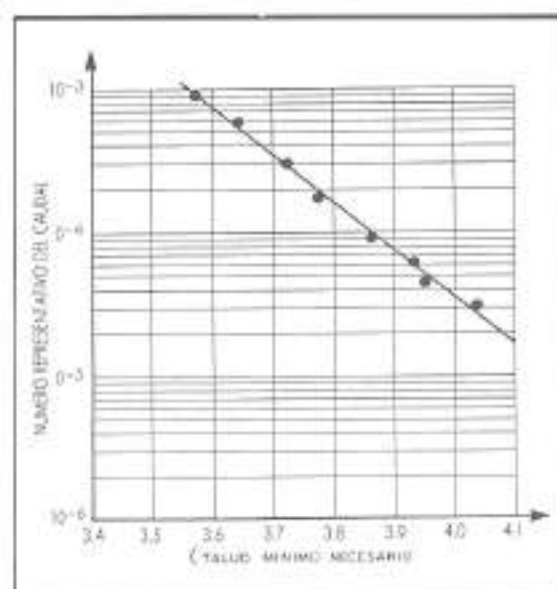


FIGURA 4. Relación entre el número representativo del canal y el talud mínimo necesario. (En escala semilogarítmica).

CONCLUSIONES

En el diseño de presas de tierra es bastante conocido que un sistema de mantos horizontales contruidos por materiales permeables tiene grandes efectos en la economía del talud de aguas arriba, cuando el espaldón está constituido por un material de muy baja permeabilidad. Sin embargo, en ocasiones no es posible encontrar materiales claramente drenantes en las zonas próximas a la cerrada de la presa. En estos casos puede ser muy interesante el uso de materiales semipermeables que disipen al menos parcialmente las presiones intersticiales resultantes de un desembalse rápido.

El método de las diferencias finitas ha demostrado ser un valioso instrumento matemático fácilmente codificable en un programa de ordenador, que permite resolver matemáticamente las ecuaciones diferenciales en dos dimensiones que rigen el fenómeno en su conjunto.

Su aplicación a un caso real ha mostrado la

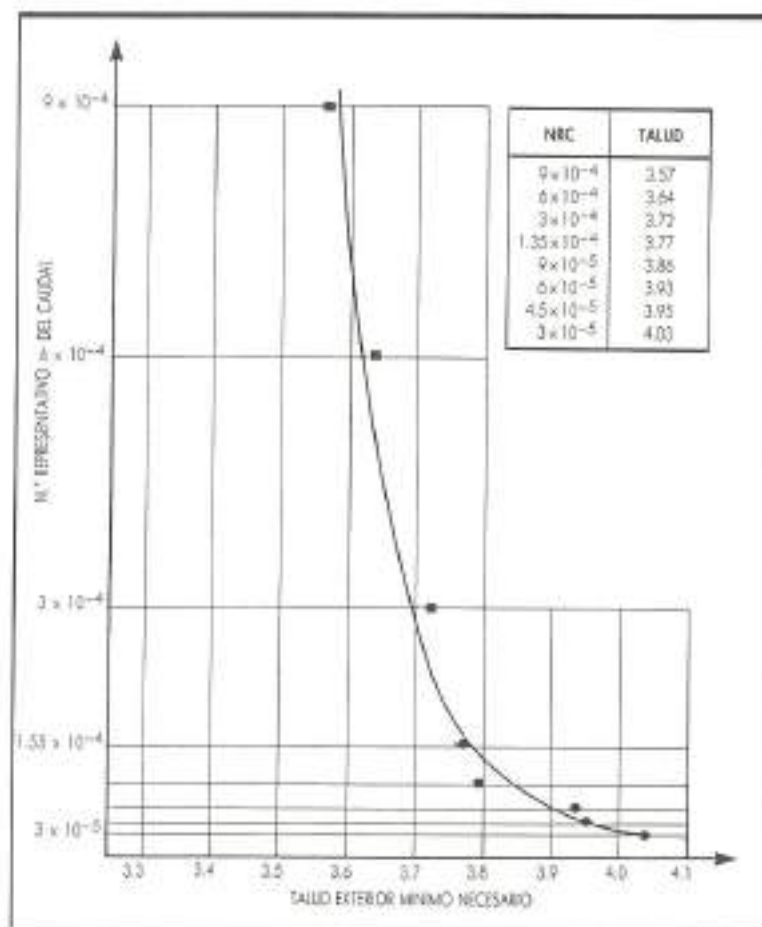


FIGURA 5. Relación entre el número representativo del caudal y el talud mínimo necesario.

utilidad de disponer de materiales de características mediocres, desde el punto de vista de la permeabilidad, para definir un sistema de capas drenantes.

En estos casos, la disipación de las presiones intersticiales no puede ser analizada suponiendo que se produce exclusivamente el flujo vertical del agua desde el material impermeable hacia las capas semidrenantes horizontales. Debe considerarse también el flujo horizontal a lo largo de los drenes.

Se ha desarrollado el programa de ordenador CONS-2D con el fin de conseguir este objetivo, resolviendo la integración de las ecuaciones en derivadas parciales por el método de las diferencias finitas. Se ha evaluado la influencia de los pará-

metros más significativos del fenómeno de disipación de presiones intersticiales, introduciendo la velocidad con que se produce el desembalse rápido.

De esta manera es posible incorporar en los cálculos de estabilidad del talud del espaldón de aguas arriba los valores medios reales, representativos de la disipación de las presiones intersticiales durante el desembalse rápido.

5. REFERENCIAS

- SKEMPTON, A. W. 1954. The pore pressure coefficients A and B. *Geotechnique*, 4:143-147.
- URIEL, S.; OLALLA, C. & CARRILLO, M. A. 1984. Dimensionamiento de la Presa de Sute y Baja, Ecuador. Laboratorio de Geotecnia, CEDEX, Madrid, Spain.



**Librería
Ciencia-Industria, S. L.**

Plaza de San Juan de la Cruz, 3
Teléfonos 234 85 56 y 233 75 43
28003 Madrid

PEDIDOS: Contra reembolso ☐ — Cheque adjunto ☐

HYDROLOGIC FREQUENCY MODELING.

Singh, V.P. —5.054—
1987 ed. 645 págs. 17.490 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Flood frequency analysis. Empirical flood frequency models. Mixed distributions. Rainfall frequency analysis. Entropy in flood frequency analysis. Parameter estimation. Selection of flood frequency models. Multivariate stochastic models. Indexes.

COMPUTERS RAILWAY OPERATIONS.

Murthy, T.K.S. —3.913—
1987 ed. 336 págs. 15.052 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Transmission and traction. Advanced control systems. Train Operations.

SOIL-STRUCTURE INTERACTION. Vol. 43

Cakmak, A.S. —5.609—
1987 ed. 373 págs. 19.928 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Effects on an irregular soil profile on site amplification. Earthquake response of nonlinear building-foundation systems. Dam-foundation interaction under spatially correlated random ground motion. Recursive evaluation of interaction forces of unbounded soil in frequency domain. Etc...

HANDBOOK OF WATER PURIFICATION. 2ª ed.

Lorch, W. —5.850—
1987 ed. 777 págs. 22.790 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: The hydrologic cycle: turnover, distribution, and utilization of water. Water physics and chemistry. Natural waters. Water quality classification. Measurement and control. Removal of insoluble particles. Ion exchange. Membrane processes. Reverse osmosis. Ultrafiltration. Electrodialysis. Freshwater desalination. Saline distillation. Chemical disinfection. Ozonation. Etc...

L'EPURATION ET TRAITEMENT LE DES EFFLUENTS. Vol. 3 (PP)

Martin, G. —5.613—
1987 ed. 297 págs. 9.328 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Présence des produits phosphorés dans l'environnement. Chimie analytique des espèces phosphorées. Phosphore et processus d'eutrophisation. Biodisponibilité du phosphore. Aspects chimiques, biochimique et environnementaux. Substituts des triphosphates dans les détergents. Etc...

APPLIED HYDRAULIC TRANSIENTS. 2ª ed.

Hari, M. —17.809—
1987 ed. 521 págs. 11.872 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Closed-conduit transient flow equations. Methods of characteristics and finite difference methods. Transients caused by pumps. Transients in hydroelectric power plants. Transients in cooling-water systems. Transients in long oil pipelines. Resonance in pressurized piping systems. Etc...

BUCKLING AND POST-BUCKLING.

Arbocz, J. —5.851—
1987 ed. 246 págs. 3.922 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Foundations of elastic postbuckling theory. Post-buckling behaviour of structures numerical techniques for more complicated structures. Effect of plasticity on post-buckling behaviour. Experimental techniques and comparison with theoretical results.

DEVELOPMENTS IN THIN-WALLED STRUCTURES. Vol. 3

Rhodes, J. —5.442—
1987 ed. 285 págs. 11.130 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Developments in cold-formed sections in Europe. Structural behavior of architectural sandwich plates. Developments in thin-walled structures in offshore applications. Lower bound methods in shell buckling. Thin-plated structures in civil engineering. Etc...

DYNAMIC BEHAVIOUR OF FOUNDATIONS AND BURIED STRUCTURES.

Banerjee, P.K. —5.868—
1987 ed. 270 págs. 11.975 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Soil dynamics: An overview. Simple physical methods for foundation impedances. Dynamic behavior of axially and laterally loaded piles and pile groups. Experimental studies of the dynamic behavior of piles and pile groups. Dynamic consolidation of nearly saturated granular media. Surface disturbance due to underground explosions. The discrete element method in geotechnical engineering.

FLOOD HYDROLOGY.

Singh, V.P. —5.050—
1987 ed. 429 págs. 14.310 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Hydrology of floods. Deterministic streamflow simulation. Stochastic streamflow simulation. Streamflow forecasting. Coastal and urban flooding. Flood management. Flood control programs.

COMPUTER IN RAILWAY MANAGEMENT.

Murthy, T.K.S. —3.909—
1987 ed. 224 págs. 11.236 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Planning and management. Information systems.

COMPUTER-AIDED SIMULATION IN RAILWAY DYNAMICS.

Dukkipati, R.V. —5.607—
1988 ed. 427 págs. 19.232 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Physical aspects. Mathematical foundation. Parameter identification and model validation. Case studies. Software survey. Track simulators.

RELIABILITY BASED DESIGN IN CIVIL ENGINEERING.

Hari, M.E. —5.745—
1987 ed. 290 págs. 11.438 Pts. IVA incluido

CONTENIDO: Elements of probability. Further concepts. System reliability. Reliability analysis. Gaining information.

AGUA VIVA



El agua padece múltiples agresiones contaminantes
en su recorrido natural.

Es imprescindible que llegue al usuario con
el tratamiento adecuado.

CADAGUA está presente allí donde se exige la mejor agua.



Depuradora de Butarque - Madrid



cadagua, s.a. Damos vida.



LA FUERZA FIRESTONE



ROCK GRIP

SUPER CROUND GRIP

BR5 Deep Tread

SUPER ROCK GRIP

En Neumáticos para Grandes Obras, FIRESTONE marca la pauta con su alta tecnología. Super-Neumáticos que por resistencia, por economía, por tracción y por mayor transmisión de potencia proporcionan la máxima rentabilidad en todo tipo de trabajos de construcción y obras públicas. Porque allí donde se mueve maquinaria, donde la dureza es el indicativo del trabajo... ¡Allí está la Fuerza Firestone!

Firestone
EN MARCHA