

PERFIL EN VOLADIZO DE LA PARTE SUPERIOR DEL TALUD DE UNA EXCAVACION Y SU EVOLUCION

MIGUEL ANGEL HACAR BENITEZ
Universidad Politécnica de Madrid

RESUMEN

Se observa a veces que en la coronación de algunos taludes en tierra hay partes en voladizo que presentan un cierto equilibrio más o menos estable.

Su origen puede ser natural o estar producido por las excavadoras al efectuar los desmontes.

Las acciones meteorológicas (cambios de temperatura, de humedad, etc.) y biológicas (raíces de plantas, etc.) pueden dar lugar a desprendimientos locales, más o menos importantes. Aún siendo pequeños, y no afectando a la estabilidad general del talud, pueden causar daños graves si están próximos a vías de comunicación (carreteras, ferrocarriles, etc.) o si los desprendimientos tienen lugar en zonas habitadas.

Como no he visto escrito nada sobre esto en los tratados corrientes de Mecánica del Suelo actuales, he creído interesante exponer lo que lei sobre ello hace tiempo y que algo he completado, por si puede tener alguna utilidad.

Sólo pretende tener un carácter elemental y orientativo del problema y como las hipótesis son excesivamente simplistas (las superficies de deslizamiento se suponen planas, etc.), los resultados tendrán una aproximación bastante grosera. Lo que resultará siempre difícil es conocer los datos para "entrar" en el problema, pues las variaciones de la cohesión, del ángulo de rozamiento y de la densidad —variables con el tiempo y con la profundidad o distancia a la superficie, y que intervienen en la evolución de las formas estables— lo complican excesivamente.

De todos modos con los modernos métodos de cálculo, otros, mejor preparados que yo, podrán en el futuro abordar el problema con más generalidad y rigor.

1. EL EQUILIBRIO DE UN TALUD

La simple observación de los taludes naturales nos muestra que su equilibrio depende esencialmente de su altura y del grado de cohesión de su material.

Así, un material granular o sin cohesión tomará a lo sumo una pendiente igual o menor que la de su talud natural.

Cuanto más cohesivo sea y menor altura tenga más fácil será que se sustente con pendiente mayor (Figuras 1 y 2).

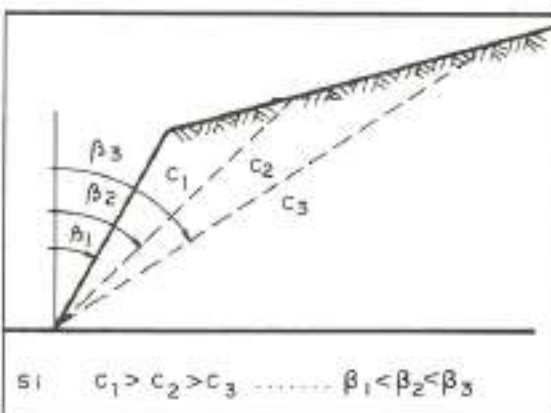


FIGURA 1.

En particular examinaremos el caso de ser $i=0$. Pasemos a considerar el equilibrio límite. En la Figura 3 la fuerza paralela a AT que tenderá a hacer deslizar el prisma ABT, de área S, será:

$$F = \gamma S (\cos \beta - f \sin \beta) - \bar{AT} \cdot C$$

Llamando φ al ángulo de rozamiento ($f =$

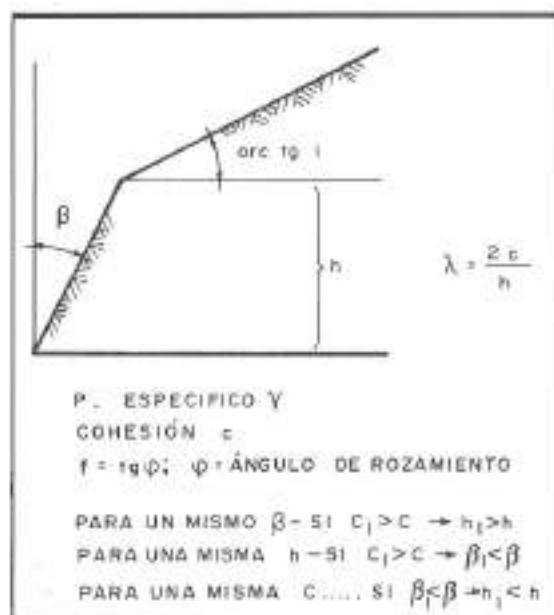


FIGURA 2.

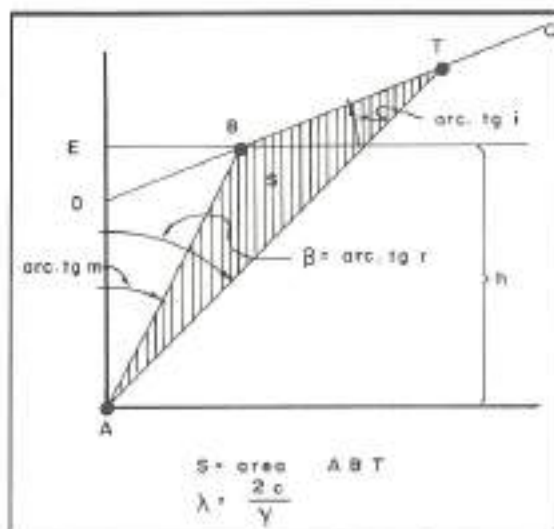


FIGURA 3.

$\operatorname{tg} \varphi$), γ al peso específico y las demás variables como se indica en la Figura, se obtiene fácilmente que:

$$S = \frac{h^2}{2} \frac{(1-m^2)(r-m)}{1-4r} \quad \text{y que}$$

$$\overline{AT} = h \frac{1-m}{\cos \beta (1-\operatorname{tg} \beta)}$$

sustituyendo en F obtendremos después de efectuar operaciones que:

$$F(1-ir) \sqrt{1+r^2} = \frac{\gamma h^2}{2} \times \left[-r^2 \left(f + \frac{\lambda}{h} \right) + r(1+mf) - \left(m + \frac{\lambda}{h} \right) \right] (1-m).$$

Diferenciando con respecto a r y haciendo después que $F = 0$; $dF/dr = 0$ se obtienen los 3 siguientes valores interesantes de r, m, h .

$$r = \operatorname{tg} \beta = \frac{1}{f} \left[1 - (1+f^2)^{1/2} \left(1 + \frac{fh\gamma}{2c} \right)^{-1/2} \right]$$

que es la cotangente del ángulo de pendiente máxima de un talud de altura dada h (para un peso específico, un rozamiento y una cohesión dada del terreno).

Así se tratase de un material granular, no cohesivo, como entonces $c = \lambda = 0$, resulta $\operatorname{tg} \beta = 1/f$, como era de esperar.

El talud correspondiente a la pendiente máxima que puede darse para una altura h es:

$$m = \frac{1}{f} \left\{ 1 - \frac{2}{fh} \left(-\lambda + [(1+f^2)\lambda(\lambda+fh)]^{1/2} \right) \right\}$$

También se comprueba que si no hay cohesión $c = 0$, resulta $m = 1/f$ para cualquier altura h .

Por último, la altura máxima h que puede mantenerse para una pendiente dada $1/m$ en un terreno de γ (p. específico), f (rozamiento) y c (cohesión) dados, es (Fig. 4):

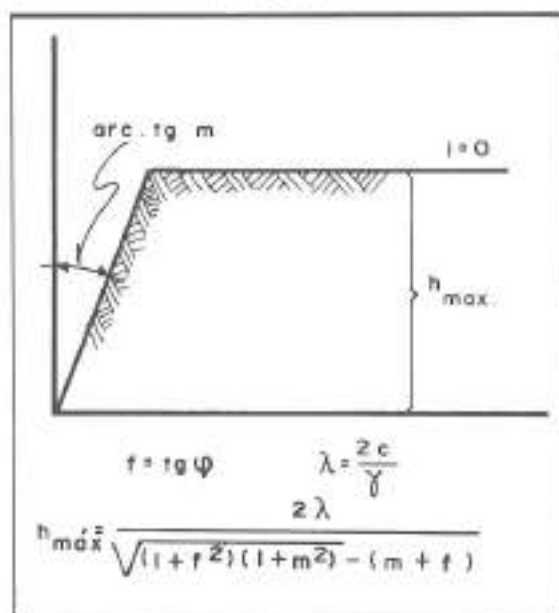


FIGURA 4.

$$h = \frac{2\lambda}{-(m+f) + [(1+F)(1+m^2)]^{1/2}}$$

Así por ejemplo, para $\gamma = 1,8 \text{ T/m}^3$; $c = 2 \text{ T/m}^2$; $\varphi = 28^\circ$ y para un talud de $m=0,25$, como entonces: $f = \tan 28^\circ = 0,5317$; $\lambda = 4/1,8 = 2,222 \text{ m}$; la altura máxima estable será:

$$h = \frac{4,444}{-(0,25 + 0,5317) + (1,2827 \times 1,0025)^{1/2}} = 11,52 \text{ m}$$

Caso especial e importante de este último corresponde a $m = 0$ ó talud vertical, para el que se obtiene: (Fig. 5) fórmula muy conocida.

$$h_{\max} = \frac{4C}{\gamma} \tan\left(45^\circ + \frac{\varphi}{2}\right)$$

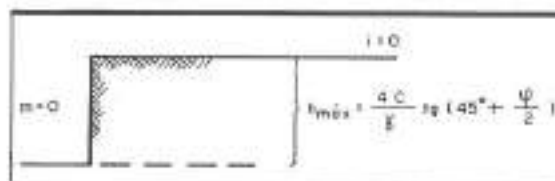


FIGURA 5.

Con los datos del ejemplo anterior, para talud vertical, $m = 0$, resulta que la altura máxima no pasaría de $\frac{4,2}{1,8} \tan 59^\circ = 7,40 \text{ m}$

Todo lo expuesto hasta aquí es clásico y se trata sólo de una aproximación pues la superficie de deslizamiento no es plana y además no tiene por qué pasar por el pie del talud. Hace más de 60 años introdujo W. Fellenius el factor de estabilidad N_s dando la altura crítica h_c en función únicamente del ángulo de la pendiente, utilizando el círculo como superficie de deslizamiento. L. Rendulic estudió también el deslizamiento considerando que estas superficies pueden ser espirales logarítmicas.

2. TALUDES CON DESPLOME

Un caso que se observa con frecuencia es el de la existencia de taludes con cierto desplome en su coronación. Lo producen a veces las excavadoras, dejando una especie de visera o pequeña ménsula de tierra (Fig. 6)

Con el tiempo, y sobre todo por la acción de las variaciones térmicas y del contenido de humedad, se va poco a poco desmoronando esta visera, aproximadamente como se indica en la figura. A veces la vegetación sujeta la tierra por sus raíces.

El cálculo del perfil de estos desmontes en voladizo no es frecuente —al menos yo no lo he

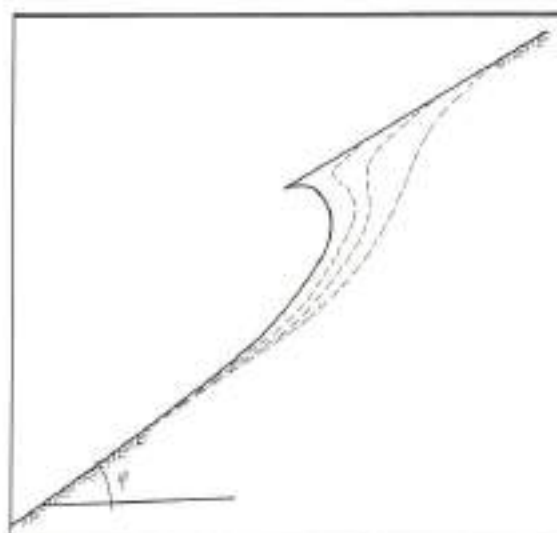


FIGURA 6.

encontrado— en la literatura técnica actual. No obstante, hace ya más de 130 años alguien abordó este problema. Así en los "Annales des Ponts et Chaussées" de 1851 M. de Sazilly, indica, apoyándose en otros trabajos (Coulomb 1736-1806; Navier, 1785-1836; Lamé; 1795-1870), algo de lo que voy a exponer a continuación, que he complementado con la resolución de alguna de las expresiones diferenciales que dejaba planteadas y con uno de los dibujos (Fig. 7) que con "plotter" han hecho mi amigo y compañero Miguel Fernández-Bollo y mi hijo M.A. Hacar Rodríguez.

3. EXPRESION DIFERENCIAL DE SU PERFIL

Lo expuesto anteriormente para taludes ordinarios nos va a servir de base para simplificar lo que sigue.

De acuerdo con la Fig. 8, estableciendo, de modo algo análogo a como antes lo hicimos, el equilibrio del triángulo (con un lado curvo) ABT, cuya área es ahora

$$S = \Delta DT - \Delta DB = \frac{\gamma x^2}{2} \tan \beta - \int_0^x y \, dx,$$

se calcula la expresión de F ó fuerza de deslizamiento sobre el plano AT. Del mismo modo, al tener en cuenta que

$$F = 0 \text{ y que } \frac{dF}{dr} = 0$$

se llega, después de algunos cálculos, a determinar la curva del perfil del talud por la expresión diferencial:

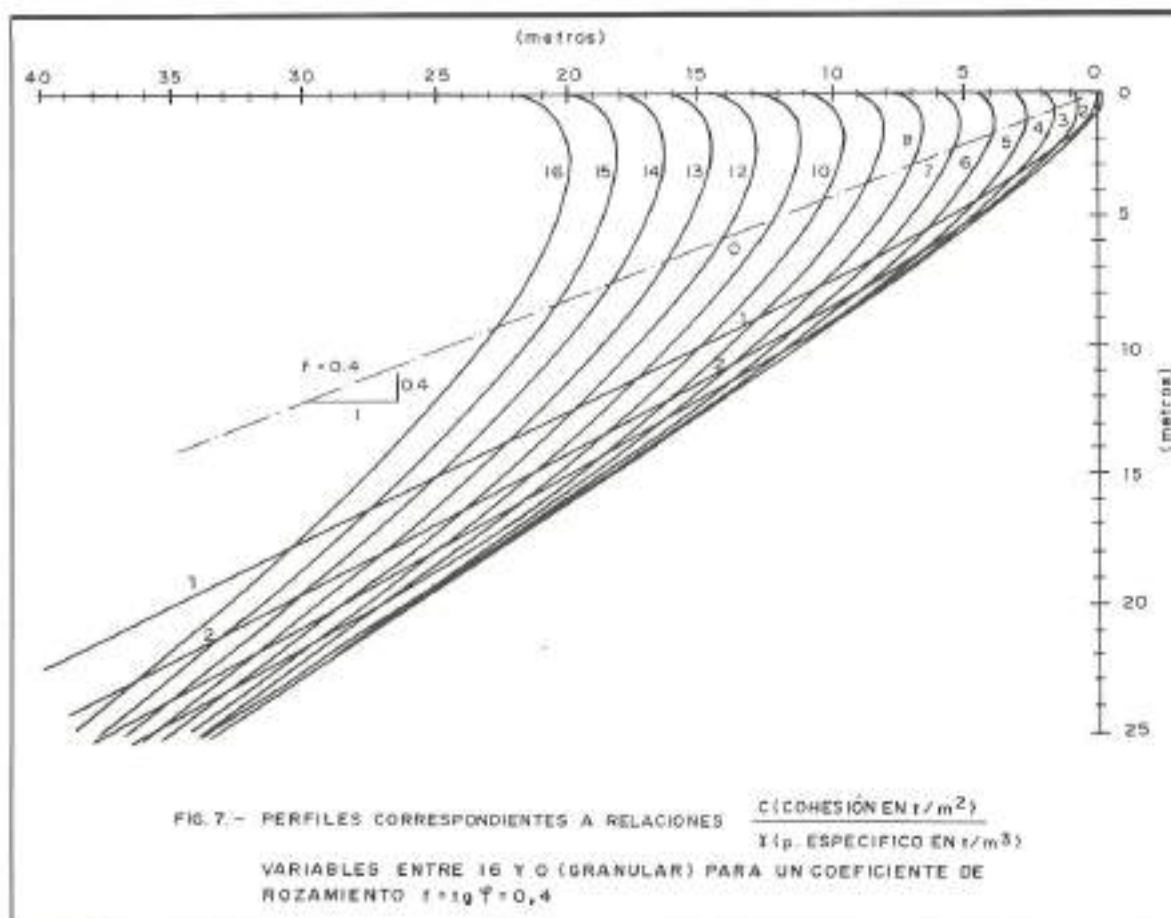


FIGURA 7.

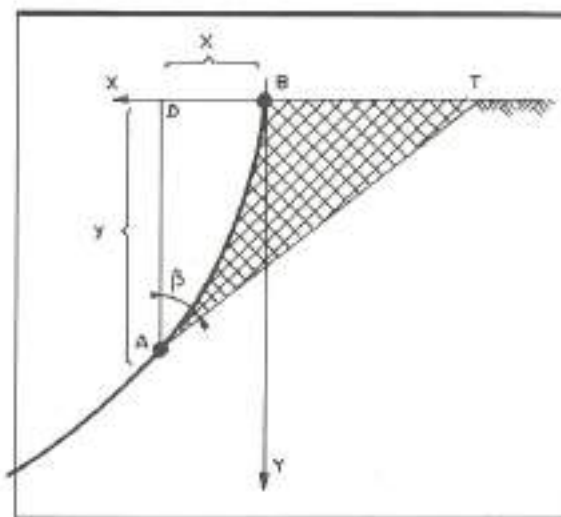


FIGURA 8.

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{f} \left[1 - \frac{\lambda}{fy} \left\{ 1 + (1+f)^{1/2} (2 + 3 \frac{fy}{\lambda}) (1 + \frac{fy}{\lambda})^{-1/2} \right\} \right] c$$

(recordamos que $f = \tan \phi$ es el rozamiento y que $\lambda = 2c/\gamma$ o sea el doble del cociente de la cohesión por el peso específico; por tanto tiene las dimensiones de una longitud).

Indica pues la inclinación que en cada punto tiene la curva con respecto a la vertical. Se reconoce fácilmente que es siempre menor que $1/f$ o sea que el perfil es más escarpado que el talud natural. En el caso de ser $C = 0$ ó $\lambda = 0$ la superficie de equilibrio es la de este talud, como era de esperar. También para valores de y muy grandes resulta $f = \tan \phi$ dicha pendiente.

Se comprueba que para $y = 0$ tiene un valor

infinito negativo, lo que nos indica que la curva es horizontal (su tangente) en el vértice, Fig. 9.

La derivada de dx/dy con respecto a y es siempre positiva lo que indica que la curva de equilibrio tiene su concavidad como aparece en la figura.

En caso de un macizo con un perfil cualquiera se podría abordar del modo análogo.

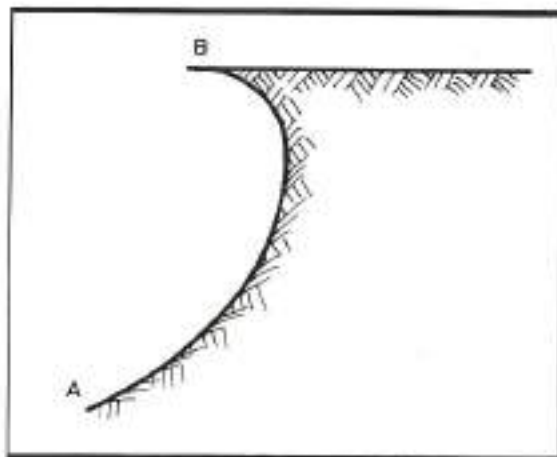


FIGURA 9.

4. INTEGRACION DE LA ECUACION DIFERENCIAL

A continuación vamos a obtener la integral de la expresión anterior (que dejó expuesta M. de Sazilly hace 136 años). Para ello la escribimos de nuevo en la forma:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{1}{f} + \frac{\lambda}{f^2} \cdot \frac{1}{y} - \frac{3(1+f^2)^{1/2}}{2f\left(1 + \frac{f}{\lambda}y\right)^{1/2}} - \frac{\lambda(1+f^2)^{1/2}}{f^2} \cdot \frac{1}{y\left(1 + \frac{f}{\lambda}y\right)^{1/2}}$$

Todo se reduce así a calcular las sencillas 3 integrales siguientes:

$$\int \frac{dy}{y} = \log \text{ nep } y,$$

$$\int \frac{dy}{\left(1 + \frac{f}{\lambda}y\right)^{1/2}} = \frac{2}{f} \left[\lambda (\lambda + fy) \right]^{1/2};$$

$$\int \frac{dy}{y \left(1 + \frac{f}{\lambda}y\right)^{1/2}} = -\log \text{ nep } \frac{\lambda + fy + [\lambda (\lambda + fy)]^{1/2}}{y}$$

Al sustituir valores queda finalmente:

$$x = \frac{y}{f} - \frac{3}{f^2} \left[(1+f^2) \lambda (\lambda + fy) \right]^{1/2} + \frac{\lambda}{f^2} \log \text{ nep } y + \frac{\lambda (1+f^2)^{1/2}}{f^2} \log \text{ nep } \frac{\lambda + fy + [\lambda (\lambda + fy)]^{1/2}}{y} + C$$

como expresión del perfil

Un estudio más detallado de esta curva lo dejamos para otra ocasión, por no hacer interminable esta exposición.

PEDIDOS: Contra reembolso ☐ — Cheque adjunto ☐

THE BRITISH TRANSPORT INDUSTRY AND THE EUROPEAN COMMUNITY

Mackie, P.-19750- 6.890 Pts.
1987 ed. 184 Págs.

CONTENIDO: Preface.— Introduction.— Impact of Regulations.— On Long Distance domestic Freight Transport in Great Britain.— Road/Rail Competition in the National freight Market.— The Transport of Britain's International Trade.— The International Regulatory Framework.— Survey of British International Surface Transport I: Consignors.— Survey of British International Surface Transport II: Transport Operators and Forwarders.— Conclusions.— Appendix, Index.

MANUAL DE TALUDES. Serie: Geotecnia. (PP)

Ayala Carcedo, F.J.-19944- 2.120 Pts.
1987 ed. 456 Págs.

CONTENIDO: Prólogo: Introducción.— Tipología y Desarrollo de los movimientos.— Reconocimientos Generales.— Investigación de detalle.— Caracterización geotécnica de materiales.— Aspectos Hidrogeológicos.— Métodos de Cálculo.— Corrección de Taludes.— Métodos de Construcción.— Criterios de diseño en Taludes.— Auscultación de Taludes.— Casos Prácticos.— Programas de aplicación a estabilidad de taludes.— Índices.

IMAGE INTERPRETATION IN GEOLOGY

Drury, S.A.-17457- 4.664 Pts.
1987 ed. 243 Págs.

CONTENIDO: Electromagnetic radiation and materials.— Human vision.— How data are collected.— Photogeology.— Digital processing of images in the visible and near-infrared.— Thermal images.— Radar remote sensing.— Geographic information systems.

HUMAN ACTIVITY AND ENVIRONMENTAL PROCESSES

Gregory, K.J.-108- 11.024 Pts.
1987 ed. 466 Págs.

CONTENIDO: Preface.— Introduction.— The Radiation Balance.— Precipitation.— Hydrological Processes.— Coastal Processes.— Ocean Processes.— Disturbance of Lacustrine Systems.— Slopes and Weathering.— River Channels.— Permafrost and Ground Ice.— Subsurface Impacts.— Soil Profile Processes.— Soil Erosion and Conservation.— Man's Impact on Vegetation: The African Experience.— Human Activity and Species Response.— The Conservation of Plants, Animals and Ecosystems.— Desertification.— A Perspective.— Index.

GROUNDWATER SYSTEMS PLANNING & MANAGEMENT

Willis, R.-1321- 11.872 Pts.
1987 ed. 416 Págs.

CONTENIDO: Groundwater Resources.— Groundwater Flow Equations.— Groundwater Quality.— The Mass Transport Problem.— Numerical Methods in Groundwater Management.— Optimization Methods for Groundwater Management.— Groundwater Supply Management Models.— Groundwater Quality Management Models.— The Inverse Problem in Groundwater Systems.— Index.

URBAN TRANSPORTATION. The New Town Solution

Dupree, H.-1379- 6.466 Pts.
1987 ed. 267 Págs.

CONTENIDO: The making of towns.— The transport scene.— The twenty-eight British new towns.— Towards a master plan.— The transport input.— The primary road system.— The residential areas.— New town Shopping.— Industry and employment.— Public transport.— Walking.— Cycling.— Parking.— Townscape.— The safety factor.— Concluding appraisal.— Appendices.— Index.

INTRODUCCION A LOS SISTEMAS DE BASES DE DATOS

Date, C.J.-14238- 4.579 Pts.
1986 ed. 646 Págs.

CONTENIDO: Arquitectura de los sistemas de bases de datos. El enfoque relacional. El enfoque jerárquico. El enfoque de redes. Revisión de los tres enfoques.

REDES DE TRANSMISION DE DATOS Y PROCESO DISTRIBUIDO

Black, U.D.-17986- 3.710 Pts.
1987 ed. 429 Págs.

CONTENIDO: Introducción. Conceptos básicos de la comunicación de datos. Componentes principales de un sistema de comunicación de datos. Lógica y bases de datos. Distorsiones de transmisión. Controles de enlace de datos. Transmisión digital. Arquitectura de redes. Redes de área local. Sistemas distribuidos. Etc...

SOFTWARE CATALOG MICROCOMPUTERS. 3 Vols.

99-19972- 37.736 Pts.
1987 ed. 988 Págs.

CONTENIDO: Software Section.— Detailed program descriptions arranged by vendor and by ISPN.— Systems Indexes.— Glossary.— How to Order Software Form.