

ESTIMACION DE LAS DOSIS DE CEMENTO MEDIANTE UN MODELO MATEMATICO EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS DE TEXTURA FINA

A. CABALLERO REPULLO (*)

F. PEREZ GARCIA (**)

J. AYUSO MUÑOZ (***)

RESUMEN. La existencia de amplias zonas de suelos expansibles en las que éstos aparecen como único material disponible, hace necesario el estudio de diversas técnicas que, de un modo sencillo y económico, mejoren sus propiedades físico-químicas y permitan su uso como material de construcción en determinadas obras de ingeniería civil.

En este trabajo se propone un modelo matemático que permite estimar la dosificación de cemento necesaria para estabilizar las distintas capas de un firme de un camino rural, en función de la resistencia a compresión simple deseada a un determinado tiempo de curado y de algunos parámetros del suelo.

ABSTRACT. The presence of extensive areas of expansive soil, where this appears to be the only material available, makes it necessary to carry out a study of a wide range of simple and economical techniques, with a view to improving the physical/chemical properties and which make them suitable for use as construction material in particular engineering works.

In this paper, a mathematical model is suggested which permits the estimation of the cement dosage necessary to stabilize the different layers of the surface of a country road, as a function of the resistance to simple compression desired for a particular curing time for some soil parameters.

INTRODUCCION

El firme, los trazados y, en general, todas las características técnicas de las vías de comunicación, han evolucionado en los últimos tiempos de forma muy importante, mejorándose la seguridad del tráfico, la comodidad del usuario, las velocidades máximas a alcanzar, a la vez que se ha conseguido mejorar la durabilidad y estabilidad de los firmes.

Los caminos rurales tienen unos problemas específicos muy concretos: son caminos de tráfico escaso y heterogéneo, produciéndose además grandes oscilaciones en cuanto a su distribución a lo largo del año, ocurriendo las máximas intensidades en los períodos de recolección (LOSA, 1979).

A finales de 1981, la longitud total de la red de caminos rurales en España era de 186.186 km, de los que el pavimento del 56 % de la red está constituido por suelo natural simplemente compactado. Desde el punto de vista constructivo, la mejora del nivel actual implica el em-

pleo de materiales de mayor calidad, tratando siempre de utilizar al máximo los materiales locales. De esta forma, la estabilización del terreno «in situ» es, en muchos casos, sobre todo cuando no existen canteras cercanas de préstamo, la solución más económica.

Una de las estabilizaciones más frecuentes es la de añadir cemento al suelo, dando lugar a una serie de interacciones de naturaleza físico-química con el suelo, que producen una mejora en sus propiedades. HERZOG y MITCHELL (1963) y KEZDI (1979) presentan un estudio detallado de tales interacciones.

La cantidad de cemento necesaria para estabilizar un suelo dependerá del tipo y naturaleza del mismo y del fin a que se destine el material tratado. Si el objetivo es usarlo en la construcción de un firme de un camino o carretera, las variables a considerar además del suelo son: las características del tráfico, la situación de la capa tratada en la estructura del firme y las condiciones climatológicas de la zona en que se vaya a establecer.

Existe una gran variedad de métodos para determinar la dosis de cemento necesaria. Los más simples están basados en los resultados obtenidos con una amplia variedad de suelos, por lo que son considerados métodos empíricos. Entre ellos se puede citar al de la Portland Cement Association (PCA, 1971).

STEWART y col. (1971), tras varios ensayos de sue-

(*) Profesor titular de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad de Córdoba.

(**) Catedrático de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad de Córdoba.

(***) Profesor Titular de Construcción de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad de Córdoba.

los estabilizados con cemento, para su empleo en bases de caminos, en Carolina del Sur, llegaron a la conclusión de que las cantidades de cemento propuestas por la PCA eran excesivamente conservadoras, proponiendo la siguiente relación entre el porcentaje de cemento necesario C y el índice de grupo del suelo IG .

$$C = 3 + IG/2 \quad (C > 6\%)$$

Sin embargo, este tipo de criterios presenta el problema de extrapolación a otras regiones de diferentes características geológicas, climáticas, etc.

Por último, existen métodos basados en la realización de ensayos de laboratorio, que al llevarse a cabo sobre el suelo en cuestión, proporcionan resultados más fiables y seguros. Los ensayos más utilizados son los de durabilidad y de resistencia a compresión simple. El primero (Norma ASTM D-560-57/76 y D-559-57/76) simula la acción de unas condiciones climáticas muy extremas, poco probables en el valle del Guadalquivir. Por ello se ha usado el criterio de resistencia a compresión simple propuesto por la Institución Británica de Normalización, BSI, que exige una resistencia de 1.724 Kn/m^2 después de siete días de curado (ROAD RESEARCH LABORATORY, 1963).

STEWART y col. (1971) consideran este valor insuficiente para el diseño de bases de caminos secundarios y proponen obtener 2.068 Kn/m^2 transcurridos siete días de curado. GREGG (1967) considera necesario conseguir 2.758 Kn/m^2 en el mismo período de curado.

El IRVDA (1983) exige valores de resistencia a compresión simple comprendidos entre 1.724 y 2.450 Kn/m^2 en función del tipo de tráfico y de la ubicación de la capa tratada en el firme.

Como los fines de este trabajo son aprovechar el material *in situ* para la ejecución de las distintas capas del firme en caminos rurales, se adoptó el criterio de obtener 1.724 Kn/m^2 a los siete días de curado en una atmósfera de 25 °C y humedad relativa próxima al 100 %.

La resistencia de mezclas de suelo-cemento es muy variada, en función de factores tan diversos como: tipo de carga (compresión, tracción, flexión, corte), tipo de suelo, tipo y contenido de cemento y tiempo y condiciones de curado.

CRISTIANSEN (1969) mostró que para un contenido de cemento dado, la resistencia a compresión no confinada descende a medida que aumenta el porcentaje de finos (partículas menores de 0,074 mm) de un suelo.

Por lo general, la resistencia a compresión simple aumenta casi linealmente con el contenido de cemento, pero la pendiente varía mucho de un suelo a otro, siendo menor para aquellos suelos de textura más fina (STEWART y col., 1971; AYUSO Y PEREZ, 1982).

El tipo de cemento utilizado tiene influencia en la velocidad de aumento de la resistencia y en la resistencia última, siendo el cemento Portland (tipo I) el más usado (MITCHELL, 1976).

Investigaciones llevadas a cabo por WILLIAMS

(1972) muestran que la relación entre la resistencia a compresión no confinada y el tiempo de curado viene expresada por:

$$R_d = R_{d_0} + K \log (d/d_0)$$

donde:

R_d = resistencia a compresión no confinada a la edad de d días en Kn/m^2 .

R_{d_0} = resistencia a compresión no confinada a la edad de d_0 días en Kn/m^2 .

K = 482,3 C para suelos granulares y 68,9 C para suelos de textura fina.

C = porcentaje de cemento en peso de suelo seco.

AYUSO y col., 1984, indican que los valores de resistencia a compresión simple de testigos obtenidos en el campo a los siete días de realizado el tratamiento, oscilan entre un 32 y un 60 % de los correspondientes obtenidos en laboratorio, lo que representa una pérdida de eficacia considerable. Esta variación dependerá de la climatología existente durante y en los días siguientes a la ejecución, así como del procedimiento constructivo empleado y del control de obra en las distintas fases de construcción de la capa.

MATERIALES UTILIZADOS

1. SUELOS. Se han empleado siete suelos, de los cuales seis se tomaron en la provincia de Córdoba y el séptimo (S-7) procede de la Vega de Carmona (provincia de Sevilla).

Previo a la realización de los tratamientos se determinaron las características físicas y químicas más relevantes de cada uno de ellos, según los procedimientos descritos por las Normas de Ensayo del LABORATORIO DEL TRANSPORTE Y MECÁNICA DEL SUELO (1973) y por BLACK y col. (1965). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 2. Asimismo se efectuó un análisis de difracción por rayos X de la fracción de arcilla, en aquellos suelos donde ésta presentaba un valor apreciable, con el fin de conocer de un modo semicuantitativo su composición mineralógica. La técnica de ensayo utilizada se encuentra descrita en KUNZE (1965) y MONTEALEGRE (1976). Los resultados se muestran en la tabla 1.

SUELOS	MONTMORILLONITA (%)	ILITA (%)	CAOLINITA (%)
S-3	—	83	17
S-4	72	28	—
S-5	49	40	11
S-6	45	51	4
S-7	54	30	16

TABLA 1. Composición mineralógica de los arcillas.

2. CEMENTO. El cemento empleado según el Pliego de Prescripciones para la Recepción de Cemento en España



Limpieza, protección y restauración de piedra ① Impermeabilizantes para la protección total de cubiertas, tejados, fachadas y sótanos. Tratamiento humedades de capilaridad. Impermeabilización y consolidado de

hormigón y suelos ① Pavimentos y revestimientos para instalaciones deportivas

① Revestimientos y pavimentos continuos de pinturas de poliuretano y de epoxi. Procesos anti-condensación. Revestimientos sanitarios para cisternas y cubas.

50 AÑOS DE INVESTIGACION Y SERVICIO



Todos estos productos y procesos están adaptados a la normativa de la CEE ① Pinturas intumescentes, esmaltes, barnices, masillas, revocos ignífugos y líquidos ignífugantes ① Pinturas y revestimientos anticorrosión, masillas de poliuretano, protección de instalaciones y maquinaria industrial.



Industrial Química Parrot, s.a.

Bolivia, 338 (Pere IV, 500) - Tel. (93) 307 16 00 - FAX 307 42 28 - 08019 BARCELONA

CEMENTOS PORTLAND^S_A

CAPACIDAD DE PRODUCCION: 1.200.000 Tm. ANUALES



FABRICANTE DE LOS CEMENTOS:

- | | |
|---------------------|-------------------|
| — I/55A | (SUPERBRILLANTE). |
| — I/45A | (DIAMANTE). |
| — II/35A | (CANGREJO). |
| — III-2/35/SR-MR-BC | (DURACEM). |
| — II-F/35A | (CANGREJO F.). |
| — V/35 | (RODACEM). |

ESTELLA, 6 - APARTADO 107 - 31002 PAMPLONA

TELS. (948) 225 803-02-01 - DPTO. COM. TEL. 22 49 65 - TELEX: 37915 CEOP E - FAX: (948) 220 822

GEOTECNIA

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
1. Textura							
— Arena, 0.075 < Ø < 2 mm (%)	62	40	34	10	13	20	10
— Lina, 0.02 < Ø < 0.075 mm (%)	29	48	23	66	73	45	29
— Arcilla Ø < 0.002 mm (%)	9	12	43	24	14	35	61
2. Propiedades mecánicas							
— Límite líquido (%)	—	25.5	51.8	38.2	40.5	39.3	58.2
— Límite plástico (%)	—	13.4	26.1	22.3	19.7	20.6	27.1
— Índice de plasticidad (%)	NP	12.1	25.8	15.9	20.8	18.5	31.1
— Coeficiente de actividad de Skempton (%)	—	1.0	0.6	0.7	1.5	0.5	0.5
— Humedad óptima de compactación (PNE) (%)	13.1	15.6	25	21.5	24.9	22.5	27.0
— Densidad seca máxima (g/cm ³)	1.82	1.75	1.47	1.61	1.51	1.58	1.47
3. Clasificación del suelo							
— Sistema unificado	SM	CL	CH	CL	CL	CL	CH
— AASHTO	A-4	A-6	A-7-6	A-6	A-6	A-6	A-7-6
4. Características químicas							
— pH en agua (1:2.5)	8.6	8.3	8.1	8.3	8.6	8.6	8.4
— Carbonatos (%)	32.5	27.8	5.8	79.9	67.8	38	29.4
— Sulfatos	—	—	—	—	—	—	—
— Materia orgánica	0.6	1.3	1.4	0.4	0.1	—	1.1

TABLA 2.

RC-75 se clasifica como PA-350, conteniendo un 18 % de cenizas volantes procedentes de la combustión del carbón en una central térmica, como aditivo activo.

MÉTODOS

Como ya hemos visto, la mayor parte de los métodos empleados para obtener el porcentaje de cemento ade-

cuerdo exigen un determinado valor de resistencia a compresión simple después de siete días de curado.

Para la obtención de la resistencia a compresión simple se tomaron como variables el porcentaje de cemento y el tiempo de curado. En la ejecución del ensayo se emplearon los moldes miniharward cuya relación altura/diámetro es 2 (7,62/3,81 cm), com-

SUELOS		S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7
TIEMPO CURADO (días)	CEMENTO (%)	R _c	R _c	R _c	R _c	R _c	R _c	R _c
—	0	86,1	198,7	213,3	224,6	225,3	214,3	223,3
1	3	747,1	819,1	324,5	693,0	706,7	441,9	328,2
	5	1.043,7	1.138,9	625,4	874,0	879,5	699,1	743,6
	7	1.243,9	1.318,0	1.242,6	1.652,0	1.011,9	913,0	1.393,5
	9	1.416,2	1.458,7	1.615,9	1.264,7	1.135,1	1.114,1	1.752,5
3	3	836,2	1.003,5	334,9	805,3	899,7	999,2	377,3
	5	1.323,5	1.442,9	831,9	994,2	1.144,9	931,3	954,5
	7	1.668,5	1.803,6	1.547,7	1.298,2	1.363,2	1.173,8	1.527,6
	9	2.051,1	2.056,7	1.972,3	1.404,4	1.532,5	1.445,1	1.971,3
7	3	1.012,3	1.184,5	440,4	645,8	924,7	695,4	511,1
	5	1.446,9	1.719,4	926,2	1.273,0	1.324,0	1.155,3	1.192,8
	7	1.923,7	2.111,8	1.789,0	1.505,0	1.536,2	1.510,5	1.951,4
	9	2.375,8	2.402,3	2.321,1	1.624,1	1.807,8	1.865,3	2.484,0
28	3	1.277,3	1.449,3	522,7	1.230,4	1.324,6	1.006,6	663,8
	5	1.839,1	2.183,5	1.177,6	1.605,3	1.643,6	1.574,4	1.738,8
	7	2.582,1	2.522,5	2.374,6	2.003,8	2.066,8	2.174,6	2.759,1
	9	3.313,9	2.815,4	3.026,3	2.205,2	2.350,5	2.711,1	3.538,9
90	3	1.463,8	1.712,0	586,7	1.368,7	1.696,2	1.118,1	718,1
	5	2.218,2	2.503,7	1.465,2	1.957,5	2.182,1	1.856,7	1.900,7
	7	3.143,3	3.020,6	2.808,9	2.585,6	2.867,6	2.630,9	3.214,0
	9	3.849,4	3.637,5	4.235,6	3.340,9	3.804,1	3.265,5	4.106,3

TABLA 3. Resultados de la resistencia a compresión simple (%)

R_c = Resistencia a compresión simple

Los valores resultantes se hallan expresados en kg/cm²

compactándose las probetas con la energía equivalente al Proctor normal y con la humedad óptima obtenida para cada uno de los porcentajes y suelos empleados. Para su determinación previamente se realizaron los correspondientes ensayos Proctor (NLT-301/72, que se corresponde con la ASTM D-558-57).

Las muestras compactadas se curaron bajo unas condiciones ambientales de $25 \pm 2^\circ\text{C}$ de temperatura, y una humedad relativa ambiente cercana al 100 %. La rotura se realizó a una velocidad de deformación constante de 1,27 mm/minuto de acuerdo con la Norma ASTM D-1633-63(79).

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La tabla 3 muestra los valores de la resistencia a compresión simple para distintos porcentajes de cemento y en diferentes tiempos de curado de todos los suelos ensayados.

Se ha realizado, en primer lugar, un ajuste lineal de la resistencia a compresión simple en función del por-

centaje de cemento. Esto se ha hecho para los distintos suelos y para cada uno de los tiempos de curado. Como puede observarse en la tabla 4 todos los ajustes se obtienen con un coeficiente de regresión muy alto, conservándose la linealidad obtenida por otros autores.

A continuación se ha buscado un modelo que proporcione el valor de la resistencia a compresión del suelo tratado, interviniendo como variable la dosificación de cemento en kg/m^3 de suelo, el tiempo de curado y algunos de los parámetros que intervienen en la caracterización de los suelos.

De estos últimos se han probado, usando las técnicas de regresión múltiple paso a paso, el índice de plasticidad, límite líquido, índice de grupo, actividad de la arcilla, la fracción de arcilla y la de limo, siendo la fracción limo-arcillosa el parámetro que tiene una gran incidencia en la eficacia del cemento (CABALLERO, 1986).

Con el proceso seguido fueron eliminándose en cada uno de los pasos la variable menos significativa obtenida a través de las pruebas *t* de Student. Al final ha quedado sólo la fracción limo-arcillosa como parámetro con gran incidencia en la eficacia del cemento, dando como resultado, para un nivel de significación de 0,01, el siguiente modelo:

$$R_c (\text{Kn/m}^2) = -1.317,4 + 2.281,8X + 23,2(1-X)(DC) + 3,03 X (DC) L_n (TC) + 4,2(1-X) (DC) L_n (TC)$$

donde:

X = % limo/(% limo + % arcilla).

(DC) = kg cemento por metro cúbico de suelo.

(TC) = tiempo de curado en días.

El coeficiente de determinación obtenido $CD = 0,938$ y la F de Fisher que proporciona el análisis de varianzas (511,6) es muy superior a la teórica en esas condiciones (3,32). Asimismo el valor de la *t* de Student para cada coeficiente de la regresión es superior al tabulado para el mismo nivel de significación anterior, por lo que puede aceptarse tanto el modelo como cada una de las variables que intervienen en él.

En el modelo propuesto, sustituyendo el valor de X y operando, puede expresarse de la siguiente forma:

$$R_c (\text{Kn/m}^2) = \frac{964,4 (\% L) - 1.317,4 (\% A)}{\% L + \% A} + \frac{23,2 (\% A) + 3,03 (\% L) L_n TC + 4,2 (\% A) L_n TC}{\% L + \% A} \cdot (DC)$$

De la anterior expresión se obtiene el valor de la dosificación de cemento:

$$(DC) = \frac{R_c \cdot (\% L + \% A) + 1.317,4 (\% A) - 964,4 (\% L)}{23,2 (\% A) + 3,03 (\% L) L_n TC + 4,2 (\% A) L_n TC}$$

SUELOS	TIEMPO CURADO (días)	COEF. DE LA REGRESION		COEFICIENTE DETERMINACION
		A	B	
S-1	1	449,2	110,67	0,9782
	3	272,9	119,48	0,9928
	7	330,4	227,37	0,9970
	28	197,5	342,60	0,9946
	90	244,2	403,99	0,9933
S-2	1	554,3	104,89	0,9588
	3	514,1	177,51	0,9809
	7	640,7	203,30	0,9801
	28	911,5	221,86	0,9441
	90	830,4	314,69	0,9883
S-3	1	-393,3	224,57	0,9820
	3	-516,7	281,39	0,9878
	7	-583,6	325,53	0,9781
	28	-836,9	435,37	0,9648
	90	-1.413,0	614,50	0,9858
S-4	1	403,0	94,66	0,9884
	3	495,1	105,07	0,9389
	7	658,0	113,20	0,9115
	28	764,8	166,09	0,9725
	90	349,8	327,23	0,9930
S-5	1	508,1	70,87	0,9904
	3	554,1	111,83	0,9604
	7	539,8	143,06	0,9618
	28	795,1	176,04	0,9846
	90	534,7	350,45	0,9750
S-6	1	122,8	111,53	0,9914
	3	203,3	139,01	0,9910
	7	147,2	193,24	0,9914
	28	152,6	285,68	0,9904
	90	52,9	360,82	0,9923
S-7	1	-442,4	246,14	0,9861
	3	-398,8	267,75	0,9828
	7	-468,9	334,37	0,9871
	28	-718,5	482,27	0,9806
	90	-958,6	573,89	0,9917

TABLA 4. Ajustes lineales $R_c = A + B \cdot C$ para los distintos tiempos de curado.

C = % de cemento sobre peso del suelo seco.

CONCLUSIONES

El modelo de regresión propuesto para estimar la dosis de cemento necesaria para suelos de textura fina, A-4/A-7-6, muestra que ésta es función de la resistencia, del tiempo en que se quiera obtener la misma y de las características del suelo. De éstas, el porcentaje de la fracción limo-arcilla tiene una gran influencia en la cantidad de cemento necesaria.

Con dicho modelo podemos obtener de modo orientativo el porcentaje de cemento necesario para conseguir una determinada resistencia a compresión simple. Ello permitiría reducir la duración de los ensayos de laboratorio y, por tanto, el tiempo de espera para el diseño de capas de suelos estabilizadas con cemento PA-350.

REFERENCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1980. Soil and rock; building stones. Part. 19. ASTM, Philadelphia.

AYUSO, J., y PEREZ, F., 1982. Influencia del tratamiento con cemento y cal en la resistencia de un suelo arcilloso típico del valle del Guadalquivir. Bol. Soc. Esp. Mec. del Suelo y Ciment. Vol. 55, pp. 25-33.

AYUSO, J.; CABALLERO, A., y PEREZ, F., 1984. Comparación entre las resistencias de laboratorio y campo en arcillas estabilizadas con cemento. Bol. Soc. Esp. Mec. del Suelo y Ciment. Vol. 68, pp. 3-9.

BLACK, C. A., y col., 1965. Methods of soils analysis. Edit. C. A. Black. Wisconsin.

CABALLERO REPULLO, A., 1986. Modificación de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos por tratamiento con cemento y alpechín. Tesis Doctoral leída en la ETSIA de la Universidad de Córdoba.

CHRISTIANSEN, A. P., 1969. Cement modification of clay soils RD 002-015. Portland Cement Association.

GREGG, J. S., 1967. The significance of compressive tensile and flexural strength tests in the design of cement stabilized pavement foundations. 4.th Regional Conf. for Africa on Soil Mech. and Found. Engr. Cape Town.

HERZOG, A., y MITCHELL, J. K., 1963. Reactions accompanying the stabilization of clay with cement. Highway Research Record No. 36:146-171.

IRYDA, 1983. Manuales Técnicos Monográficos n.º 1. Caminos Rurales. Ministerio de Agríc., Pesca y Alimentación.

KEZDI, A., 1979. Stabilized earth roads. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam.

KUNZE, G. W., 1965. Pretreatment for mineralogical analysis. Cap. 44 de Methods of soil analysis. American Soc. of Agronomy, pp. 568-577.

LABORATORIO DEL TRANSPORTE Y MECANICA DEL SUELO, 1973. Normas de ensayo. Madrid.

LOSA, J., 1979. Caminos económicos. Ed. Mundi Prensa. Madrid.

MITCHELL, J. K., 1976. The properties of cement-stabilized soils. Workshop on materials and Method for Low Cost Road, Sept. Leura, Australia.

MONTEALEGRE, L., 1976. Estudio mineralógico de los sedimentos y suelos de la depresión del Guadalquivir (Sector Central: Córdoba). Tesis Doctoral leída en la Universidad de Granada, Facultad de Geológicas.

PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 1971. Soil-cement laboratory Handbook. PCA Illinois.

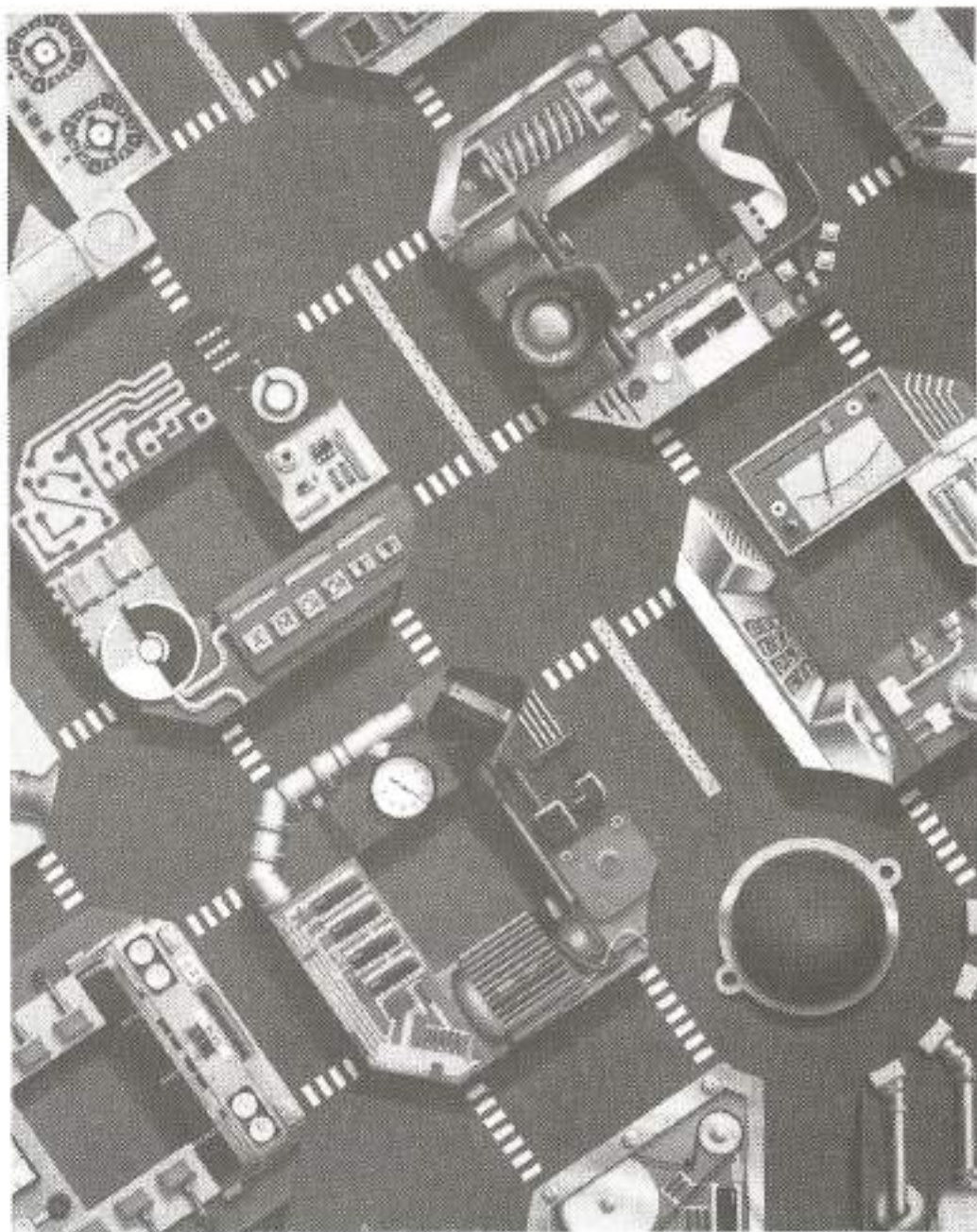
ROAD RESEARCH LABORATORY, 1963. Mecánica del suelo para ingenieros de carreteras y aeropuertos.

STEWART, R. L., y col., 1971. Stabilization of Piedmont soils for use as a base material on secondary road projects. Highway Res. Record. 351:221-34.

WILLIAMS, R. I. T., 1972. Properties of cement stabilized materials. Jour. of the Inst. of Civil Engineers. Vol. XIX, n.º 2.

La Ciudad Construye el Futuro.

Transporte público.
Reciclaje de residuos.
Planeamiento
urbanístico.
Telecomunicaciones.
Cartografía.
Gestión Municipal.
Medio ambiente.
Todo lo que las
tecnologías pueden
aportar para solucionar
los problemas de las
grandes ciudades y
mejorar nuestra calidad
de vida estarán en
BARNATEC.
Del 6 al 11 de Junio, en el
marco de la FIB 89.



Àrea metropolitana de Barcelona



Ajuntament de Barcelona



El máximo exponente.



CASA DE SANT JORDI

