

Ingeniería Civil

NUM. 170/2013

ISSN: 0213-8468



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE FOMENTO

MINISTERIO
DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN
Y MEDIO AMBIENTE

CEDEX
CENTRO DE ESTUDIOS Y
EXPERIMENTACIÓN
DE OBRAS PÚBLICAS

+ desarrollo sostenible

Más que agua

Talento, conocimiento y compromiso.
Aportamos respuestas adecuadas
para una gestión más eficiente.
Compartimos conocimiento
y generamos innovación.
Trabajamos por un futuro basado
en el compromiso y la cooperación.

 **AQUALOGY**
Where water lives

SOLUCIONES INTEGRADAS
DEL AGUA PARA UN
DESARROLLO SOSTENIBLE

www.aqualogy.net



COMITÉ DE REDACCIÓN

Presidente

Miguel González Portal

Vocales

Enrique Dapena García

Victor Elviro García

Antonio Lechuga Alvaro

Pablo Mira McWilliams

M^o Angeles de Pablo Sanmartín

Francisco Javier Sainz de Cueto Torres

Francisco Sinis Fernández

Jaime Tamarit Rodríguez

Secretaría

Ana García Neri

Alejandro D. Martos Rodríguez

Olga Sánchez de la Torre

REDACCIÓN

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid - Telf.: 913 35 72 69 - Fax: 913 35 72 49

e-mail: ingcivil@cedex.es

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) no se hace responsable de las opiniones, teorías o datos publicados en los artículos de Ingeniería Civil, siendo ello responsabilidad exclusiva de sus autores.

COORDINACIÓN DE PUBLICIDAD

Manuel Pombo Martínez

PUBLICIDAD

Ornse, 6 - Telfs.: 915 55 36 93 - Fax: 915 56 40 60 - 28020 Madrid

e-mail: revistacivil@gmail.com

PRECIO DE ESTE EJEMPLAR: 12,25€

I.S.S.N.: 0213-8468 - N.I.P.O.: 163-13-003-5

Depósito Legal: M-28150-1971 - AUTOEDICIÓN Y PUBLICIDAD



NUESTRA PORTADA: Pista de ensayo acelerado de firmes. Centro de Estudios del Transporte. CEDEX.

SUMARIO

ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA EN CALIFORNIA (USA): CUARTA PARTE (IV) FRESNO-SACRAMENTO (ROSEVILLE). <i>HIGH SPEED RAILWAY IN CALIFORNIA (USA): FOURTH PART (IV) FRESNO-SACRAMENTO (ROSEVILLE).</i> Manuel Díaz del Río Jáudenes, Luis Fort López-Tello y Carmen Fort Santa-María	3
25 AÑOS DE LA PISTA DE ENSAYO ACELERADO DE FIRMES DEL CEDEX. Javier Pérez Ayuso, Belén Cadavid Jáuregui, José Orencio Marrón Fernández y Oscar Gutiérrez-Bolívar Álvarez	13
PENETRACIONES ESTÁTICAS EN MATERIALES GLACIARES POLACOS. PROPUESTA DE CORRELACIONES A UTILIZAR. Juan-Alfonso Carcolé Galea y Ana María Aguilar Bauza	29
ESTUDIO EN MODELO FÍSICO 3D DEL COMPORTAMIENTO DE LA PLAYA DEL CASTILLO DE SAN CRISTÓBAL (ISLA DE GRAN CANARIA). M. A. Rodríguez Gil, J. F. Sánchez González, A. Lechuga Álvaro y R. M. Gutiérrez Serret	43
EL PAPEL DEL CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS DEL CEDEX EN LA DIFUSIÓN DE LOS DATOS HIDROLÓGICOS. Luis Quintas Ripoll	53
SEGUIMIENTO DEL USO DE LAS ESTRUCTURAS TRANSVERSALES DE LA AUTOVÍA A-40 POR LOS VERTEBRADOS TERRESTRES, ANTES Y DURANTE LA CONSTRUCCIÓN DE LA LÍNEA DE ALTA VELOCIDAD MADRID-LEVANTE. Esther Juárez Sanz, Cristina Mata Estacio, Manuel G. Sánchez-Colomer, Juan E. Malo Arrázola, Jesús Herranz Barrera y Francisco Suárez Cardona	67
INFLUENCIA DE LAS VÍAS RÁPIDAS EN LA DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA DE LA CLIENTELA DE CUATRO MERCADOS DE MADRID. Julio Pozueta Echavarrí y Francisco José Lamíquiz Daudén	76
RESISTENCIA A TRACCIÓN DE FIBRAS DE HENEQUÉN (<i>AGAVE FOURCROYDES</i> LEMAIRE) IMPREGNADAS CON SUSTANCIAS HIDRÓFOBAS EN MEDIO ALCALINO. Magali Torres Fuentes y Liset León Consuegra	87
MODELACIÓN ESTOCÁSTICA EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA. APLICACIÓN AL DISEÑO GEOTÉCNICO DE CIMENTACIONES SUPERFICIALES EN SUELOS FRICCIONALES. Armando Jesús Martínez Rodríguez y Gilberto Quevedo Sotolongo	93
APLICACIÓN DE UNA ECUACIÓN DE VELOCIDAD MEDIA EN RÉGIMEN NO UNIFORME: ANÁLISIS DETALLADO DEL TRANSPORTE EN EL CANAL CALTECH USANDO EXCEL. Alfredo José Constain Aragón	103

*En la página 125 y en nuestra web <www.cedex.es>
encontrará las normas para la publicación de artículos*



LAS CARRETERAS HECHAS
CON BETUNES **ELASTER** AÚN ESTARÁN AHÍ
CUANDO YA NO SEAN NECESARIAS.



**PROAS PRESENTA ELASTER, SU NUEVA GAMA DE
BETUNES MODIFICADOS CON POLÍMERO.**

Tecnología punta aplicada al Betún para que tus carreteras
sean más seguras, ecológicas y longevas.

www.proas.es

PROAS

Innovando para ti

Alta Velocidad Ferroviaria en California (USA): Cuarta Parte (IV) Fresno–Sacramento (Roseville)

High Speed Railway in California (USA): Fourth Part (IV) Fresno–Sacramento (Roseville)

MANUEL DÍAZ DEL RIO JÁUDENES (*), LUIS FORT LÓPEZ–TELLO (**), y CARMEN FORT SANTA–MARÍA (***)

RESUMEN El presente artículo, es la cuarta parte de la serie “Alta Velocidad Ferroviaria en California (CHSR)”. Recoge la Alternativa “Stockton Arch”, que el Proyecto FARWEST presenta a la prevista por la Authority (CHSRA), para la Línea HSR Fresno–Sacramento, en programación y en trazado. Éste discurre, desde la gran Terminal de Fresno (implantada en las afueras al suroeste de la ciudad) por el segmento sur del “mar interior” (que en el Terciario Superior ocupaba el actual Valle Central), hasta Stockton, y por el segmento norte, hasta Sacramento. El Paet de Ripperdan (\approx pK 40) queda conectado por carretera con el PAET de Oroloma de la Línea HSR Fresno–San Francisco (Golden Gate Alternative). La última parte del trazado de la Línea HSR Fresno–Sacramento (Stockton Arch Alternative), coincide en alineación y rasante con la Línea HSR San Francisco–Sacramento (Crossing Bay Alternative) a la altura de Roseville, donde se emplaza la gran terminal norte de la red de California, desde la que se unirá ésta con la de Nevada, por Reno..

ABSTRACT *This article forms the fourth part of the series entitled “High Speed Railway in California (CHSR)”. It addresses the “Stockton Arch” alternative, which the FARWEST Project presents in scheduling and in alignment as to that provided for by the Authority (CHSRA) for the Fresno–Sacramento HSR Line. The latter runs from the grand Fresno Terminal (located in the outskirts to the southwest of the city) through the south segment of the “inland sea” (which occupied the current Central Valley in the Upper Tertiary) to Stockton and through the north segment to Sacramento. The Ripperdan TSAP (post of passing and stabling trains), \approx kilometer point 40, connects with the Oroloma TSAP of the Fresno–San Francisco HSR Line (Golden Gate Alternative) by road. The last part of the Fresno–Sacramento HSR Line alignment (Stockton Arch Alternative), coincides in alignment and grade with the San Francisco–Sacramento HSR Line (Crossing Bay Alternative) at Roseville, where the great north terminal of the California network is located, from which the latter will be linked with Nevada’s network through Reno.*

Palabras clave: Alta Velocidad, California, Grandes túneles urbanos, Grandes viaductos.

Keywords: High Speed, California, Large urban tunnels, Large viaducts.

(*) Dr Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Ex Director de Infraestructuras, de Planificación, y de Operaciones Internacionales de Renfe. Ex Presidente de la Commission “Tunnels”, Union Internationale des Chemins de Fer (UIC). París. Catedrático Jubilado de la UPM. Professor “at large” Berkeley Univ. (Institute for Transportation Studies). California. Jury au Doctorat. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse). E-mail: mdrio@telefonica.net

(**) Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Dr. Ingeniero Agrónomo. Ministerio de Fomento. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Laboratorio de Geotecnia. Profesor Titular excedente de la UPM. E-mail: lfort@ciccp.es

(***) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. DEA en Ingeniería del Terreno. Eptisa, S.I. División de Infraestructura del Transporte. Madrid. E-mail: cfort@eptisa.com

1. INTRODUCCIÓN

La línea de alta velocidad Fresno-Sacramento de la CHSRS en el Proyecto FARWEST se presenta como "Stockton Arch Alternative" a la prevista por la CHSRA (Authority) cuya primera parte (tramo Fresno-Merced) parece decidida la Authority a que sirva de punto de partida de la red, haciéndolo así, junto con el tramo Fresno-Bakersfield, de forma que se constituya el Central Valley como columna vertebral de la misma. Del Central Valley, a la altura de Chowchilla partirá la conexión con el área de la Bahía, produciéndose entonces, cuando esta conexión esté terminada, la entrada en operación, según la previsión de la Authority, de la red.

El proyecto Farwest, como ya se indicó en la parte I de esta serie de artículos, se plantea para adelantar la operatividad de la fase inicial de la red, haciéndola comercialmente viable, mediante el aplazamiento de la construcción del tramo Fresno-Merced, desde la fase inicial programada por la CHSRA, hasta que estén construidas las líneas Fresno-San Francisco y Fresno-Los Ángeles, llevándose a cabo entonces, como se describe a continuación, la construcción de la tercera gran línea de la red, que desde la terminal de Fresno comunique el Central Valley con la capital del Estado, Sacramento. Tiene una longitud de 290 Km (180,2 mile) y un presupuesto de 3.786M\$.

2. TRAYECTO FRESNO-MERCED

Este trayecto programado por la Authority como Section II del Initial Central Valley Project, según puede verse en la Tabla 1, tiene, según el diseño previsto en el Proyecto Farwest, formando parte de la "Stockton Arch Alternative", una longitud de 99 Km (61,5 mile), con un presupuesto de 853 M\$, todo él a cielo abierto, sin especiales dificultades constructivas.

1. INTRODUCTION

The CHSRS' Fresno-Sacramento High Speed line in the FARWEST Project is presented as the "Stockton Arch Alternative" to that planned by the CHSRA (Authority), the first part of which (Fresno-Merced section) the authority seems to have decided will act as the network's starting point, thus, together with the Fresno-Bakersfield section, turning the Central Valley into its backbone. The Bay area connection will start from the Central Valley at Chowchilla and then, the network will come into service, when this connection has concluded, according to the Authority's provision.

As pointed out in part I of this series of articles, the Farwest Project is proposed in order to bring the network's initial phase into operation sooner, making it commercially viable, by postponing the construction of the Fresno-Merced section, from the initial CHSRA scheduled phase until the Fresno-San Francisco and Fresno-Los Angeles lines have been built, after which, as described below, the third long line on the network will be constructed and will connect the Central Valley to the State capital, Sacramento, from the Fresno terminal. It has 180,2 mile (290 km) length and construction budget of 3.786 M\$.

2. FRESNO-MERCED ALIGNMENT

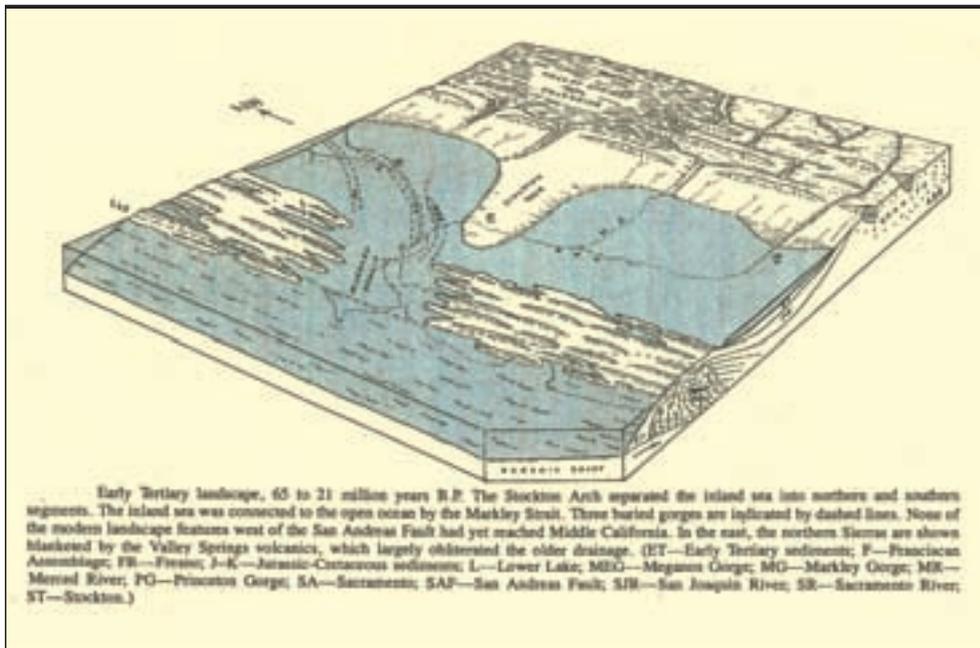
Scheduled by the Authority as Section II of the Initial Central Valley Project, as can be seen in Table 1, this alignment is 99 Km (61.5 miles) long according to the design provided in the Farwest Project, forming part of the "Stockton Arch Alternative". It is budgeted at 853 M\$, runs completely in the open and hasn't particular construction difficulties.

Phase	Project	Section	Length (km)	Earth Moving (included tunnelling) (Mm ²)	Estimated Cost (M\$)	Journey time (h.m)
I	Initial Central Valley	I Fresno-Bakersfield	157	43,82	1.889	0,29
		II Fresno-Merced	99	7,94	853	0,19
	Connection Bay Area	III Fresno-San José	222	39,46	4.938	0,46
	Connection Los Angeles Basin	IV Bakersfield-Los Angeles Airport	166	39,20	6.458	1,00
	Extension to San Francisco Airport	V San José-San Francisco Airport	52	6,50	2.027	0,13
	Extension to Anaheim	VI Los Angeles Airport-Anaheim	62	8,65	2.177	0,12
	TOTAL PHASE I: San Francisco Airport-Anaheim			758	145,57	18.342
II	Extension to Sacramento Airport	VII Merced-Sacramento Airport	191	31,66	2.933	0,36
	Extension to San Diego Airport &	VIIIa Anaheim-San Diego Airport	117	26,48	4.666	0,30
	Inland Empire	VIIIb Branch line to Riverside	55	7,54	1.969	0,14
	TOTAL PHASE II: Ampliation system to Sacramento & San Diego			363	65,68	9.568
III	Bay Crossing	IX San Francisco Airport -Vallejo	57	3,67	4.291	0,14
	Completion system to Sacramento	X Vallejo-Sacramento Airport	110	56,59	2.619	0,22
	TOTAL PHASE III: Closing system through San Fco. Bay			167	60,26	6.910
TOTAL	SYSTEM		1.288	271,51	34.820	

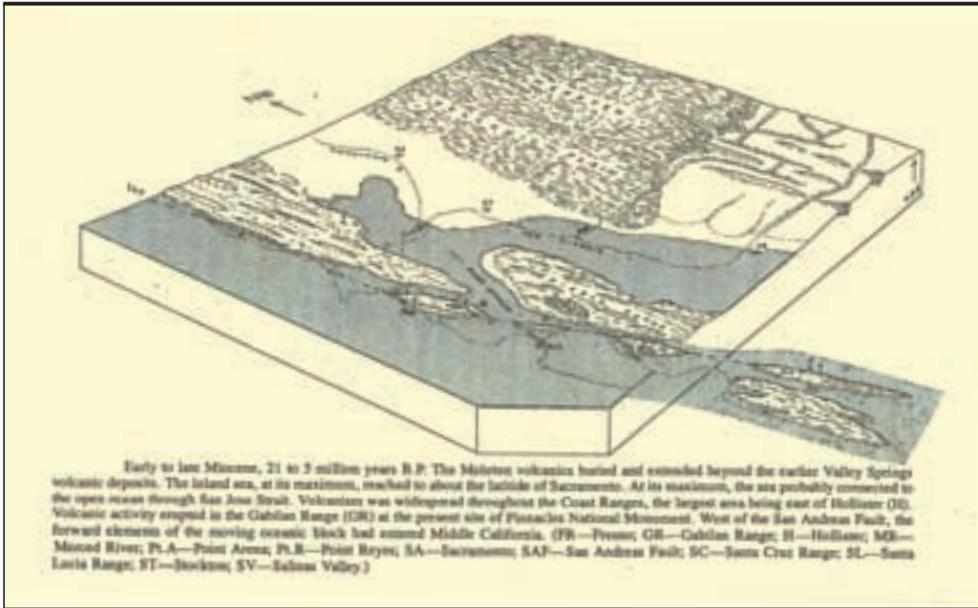
TABLA/E 1. Trayecto Fresno-Merced (según Proyecto FARWEST) / Section Fresno-Merced (according to FARWEST Project).



FIGURA/E 1. "Stockton Arch Alternative" (formando parte del Proyecto Farwest) / "Stockton Arch Alternative" (part of Farwest Project).



FIGURA/E 2. Stockton Arch Alternative (Fuente: "Geologic History of Middle California" by Arthur D. Howard) / Stockton Arch Alternative (From: "Geologic History of Middle California" by Arthur D. Howard).



FIGURA/E 3. El Estrecho de San José en el Mioceno (Fuente: "Geologic History of Middle California" by Arthur D. Howard) / San José pass in the Miocene (From: "Geologic History of Middle California" by Arthur D. Howard).

El nombre de esta alternativa pretende identificar la ruta hacia Sacramento, al Este de la actual Bahía de San Francisco, atravesando el Arco de Stockton, que en el Terciario Superior separaba el mar interior en segmento norte (área de Sacramento) y segmento sur (área de Merced y Fresno), quedando conectado con el Océano Pacífico en esa época por el Estrecho de Markley (Figura 2) y más tarde en el Mioceno, a través del Estrecho de San José. El segmento norte del mar interior quedó posteriormente cubierto de sedimentos y el segmento sur inundando lo que después serían los valles del Merced River y de San Joaquín River en el actual Central Valley (Figura 3).

La otra ruta a Sacramento, desde San Francisco, cruzando la Bahía, que se describirá en un próximo artículo, está programada en la Fase II del Proyecto FARWEST de la CHSR, pero no la contempla la red prevista por la Authority (CHSRA) en ningún momento, lo que pone en evidencia un desajuste de ésta con la red global de alta velocidad de Estados Unidos USHSR Network (Figura 4).

Para la explotación del trayecto Fresno-Merced, se prevé la implantación de un PAET (Puesto de Adelantamiento y Estacionamiento de Trenes) intermedio entre las dos estaciones, próximo a la localidad de Ripperdan (pk ≈ 40), de 2,3 Km de longitud, en terraplén de 2 m de altura (Figura 5A), con acceso desde la carretera local a Firebaugh, por la que se puede comunicar también con el PAET de Oroloma en la LAV Fresno-San Francisco (Alternativa Golden Gate) y desde la carretera estatal secundaria 145 a Madera en la Hwy 99 a Fresno y Sacramento. La carretera 145 (Figura 5B), también comunica este PAET con el PAET de Kerman de la LAV Fresno-San Francisco.

Antes de llegar al PAET de Ripperdan, el trazado cruza el río San Joaquín, con un gran viaducto de 1.200 m de longitud con un arco de tablero superior de 200 m de luz, ajustándose al terreno con una alternancia de tramos en pendiente y en rampa de pequeña magnitud, hasta el citado PAET de Ripperdan. A la salida del PAET y hasta la estación HSR de Merced, la rasante en ligera pendiente del 0,05%, cruza con estructuras menores, puentes sobre los ríos afluentes por la derecha del San Joaquín River, Fresno River, Chowchilla River y pasos bajo varias carreteras locales, la Hwy 152 (de Chowchilla a Gilroy) y la secundaria estatal 59 de Merced a

This alternative's name intends identifying the route to Sacramento, to the East of the current San Francisco Bay, crossing the Stockton Arc which, in the Upper Tertiary, separated the inland sea into the north segment (Sacramento area) and the south segment (Merced and Fresno area), and was connected to the Pacific Ocean at that time by the Strait of Markley (Figure 2) and later, in the Miocene, through the Strait of San José. The inland sea's north segment was subsequently sediment covered and the south segment flooded what would later become the Merced River and San Joaquín River Valleys in the current Central Valley (Figure 3).

The other route to Sacramento, from San Francisco crossing the Bay, which will be described in a forthcoming article, is scheduled in Phase II of the CHSRs' FARWEST Project, but is not addressed at any time at all by the network provided for by the Authority (CHSRA), which proves that the latter is out of step with the overall United States High Speed (USHSR) Network (Figure 4).

An intermediate TSAP (Post of Passing and Stabling Trains) is planned to be built for the Fresno-Merced alignment's operation, between the two stations, close to Ripperdan (p.k. ≈ 40), 2.3 Km long, on a 2 m high embankment (Figure 5A), accessible from the local highways to Firebaugh and, therefore, connection can also be made with the Oroloma TSAP on the Fresno-San Francisco HSL (Golden Gate Alternative) and from the secondary State highway 145 to Madera on the Fresno and Sacramento Hwy 99. Highway 145 (Figure 5B), also connects this TSAP with the Kerman TSAP of the Fresno-San Francisco HSL.

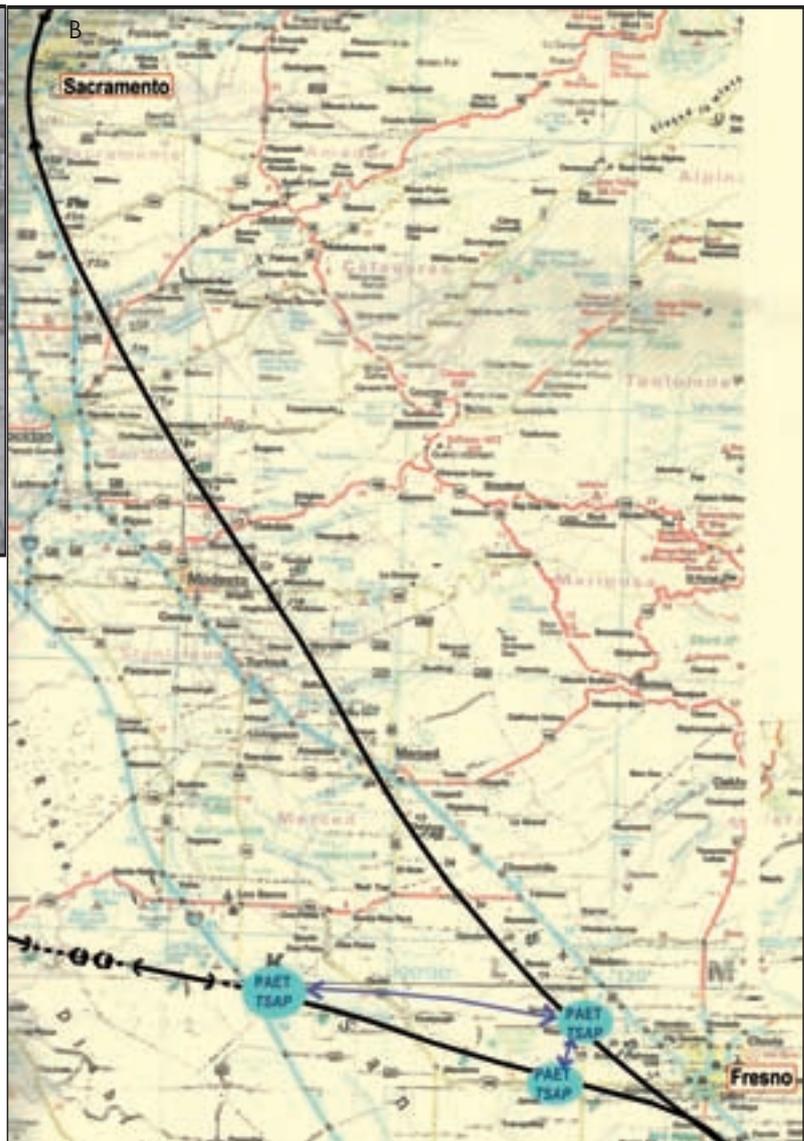
Before arriving at the Ripperdan TSAP, the alignment crosses the San Joaquín river via a large, 1.200 m long viaduct (upper deck) of more than 200 m span, adapting to the ground with alternating sloping and small ramp sections up to the said Ripperdan TSAP. At the TSAP's exit, up to the Merced HSR station, the grade crosses, in a slight slope of 0.05%, via minor structures, bridges over tributary rivers on the right of the San Joaquín River, Fresno River, Chowchilla River and overpasses under several local roads, Hwy 152 (from Chowchilla to Gilroy) and the secondary State 59 from Merced to Rod Top on the 152.



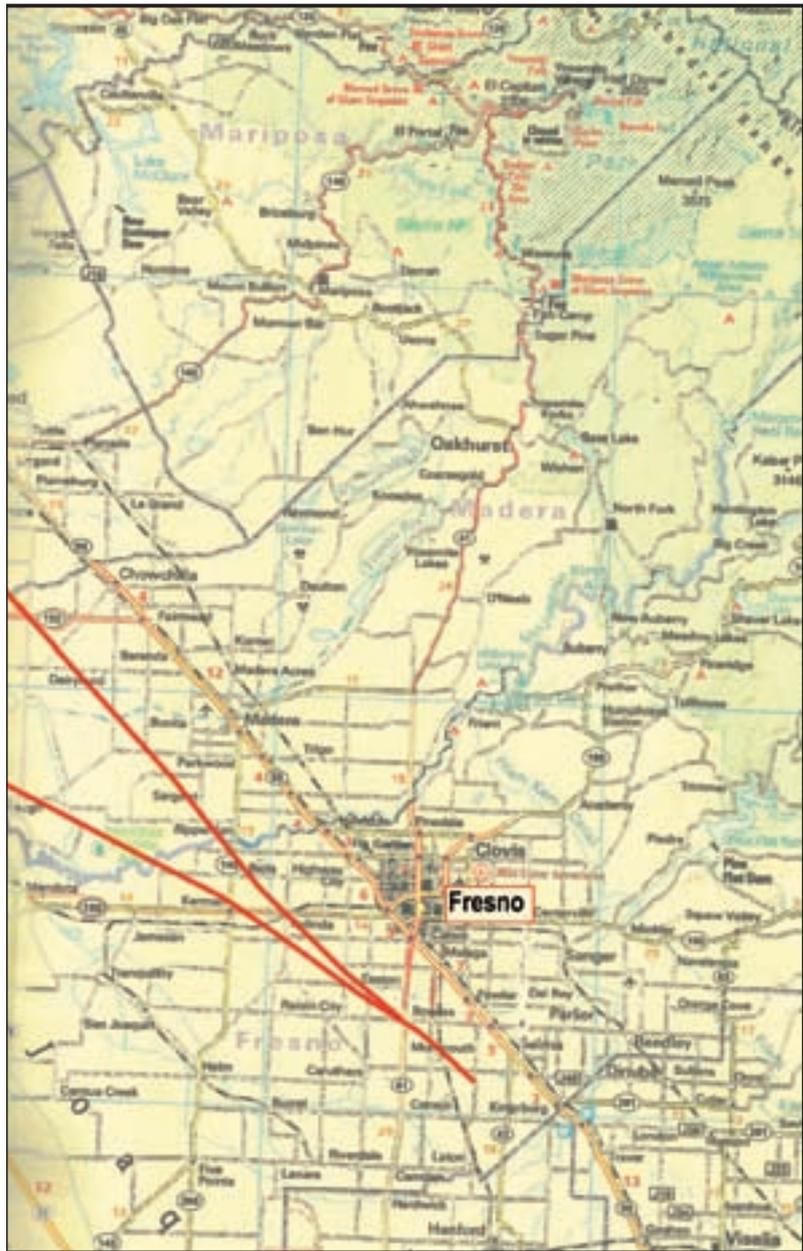
FIGURA/E 4. Línea San Francisco-Sacramento, cruzando la Bahía, prevista en la red de alta velocidad de Estados Unidos / San Francisco-Sacramento Line, crossing the Bay, foreseen in the USHSR.



FIGURA/E 5A. PAET Tipo (Fuente ROP N° 3.388, Junio 1999). Línea Madrid Sevilla / TSAP type (Source ROP N° 3.388, June 1999) Madrid-Sevilla line.



FIGURA/E 5B. PAETs interconectados. Líneas desde Fresno a Sacramento y a San Francisco / Interconnected TSAP. Lines from Fresno to Sacramento and to San Francisco.



FIGURA/E 6. Cruce HSRL Fresno-Sacramento con varias carreteras / HSRL Fresno-Sacramento crossing with several Roads.

Rod Top en la 152. Entre Fresno y el PAET de Ripperdan el trazado cruza igualmente varias carreteras locales y la secundaria 180 de Fresno a Mendota (Figura 6).

3. TRAYECTO MERCED-SACRAMENTO

De Merced a Sacramento se proyectan cuatro PAETs intermedios: Turlock-Ballico (pk≈126), Modesto (con edificación y vías de apartadero de más entidad por su función de estación intermedia para trenes lanzadera Fresno-Sacramento) (pk≈143), Stockton-Linden (pk≈196) y Elk Grove (pk≈242). La longitud de este trayecto es de 191 Km (118,7 mile) y su presupuesto de 2.933 M\$.

Este trayecto, con rasante de características análogas al anterior, rampas y pendientes de pequeña a mediana magnitud. Las cotas de las estaciones de Fresno (82 m), Merced (45 m), Modesto (44,5 m) y Sacramento (33,9 m) y la no existencia de

The alignment crosses several local roads and the secondary 180 from Fresno to Mendota (Figure 6) between Fresno and the Ripperdan TSAP.

3. MERCED-SACRAMENTO ALIGNMENT

Four intermediate TSAPs are planned from Merced to Sacramento: Turlock-Ballico (p.k. ≈126), Modesto (with buildings and siding tracks of greater importance for their working as an intermediate station for Fresno-Sacramento shuttle trains) (p.k.≈143), Stockton-Linden (p.k.≈196) and Elk Grove (p.k.≈242). This section is 118,7 mile (191 Km) length and its construction budget 2.933 M\$.

This alignment has a grade similar in characteristics to the foregoing, small to medium sized ramps and gradients. The altitudes of the Fresno (82 m), Merced (45 m), Modesto (44.5 m) and Sacramento (33.9 m) stations and the non ex-



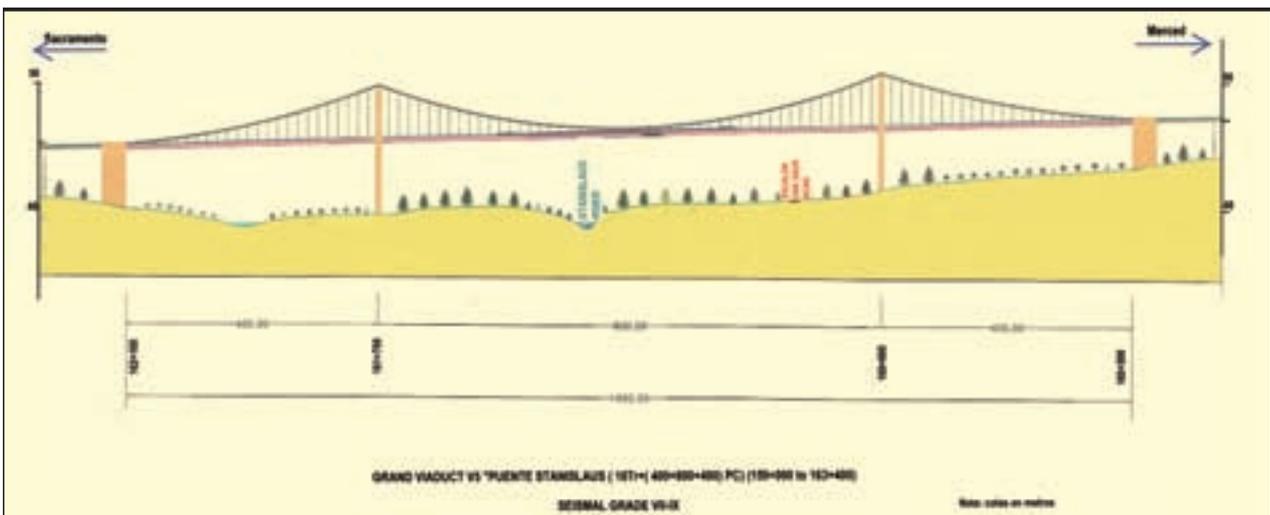
FIGURA/E 7. Afluentes de las cuencas de los Ríos San Joaquín y Sacramento (Fuente: "Geologic History of Middle California" by Arthur D. Howard) / Tributary rivers of the basin of San Joaquin River and Sacramento River (From: "Geologic History of Middle California" by Arthur D. Howard).

relieves importantes, determinan la rasante de toda la línea, con un movimiento de tierras reducido, deficitario en $2,44 \text{ Mm}^3$ en el trayecto hasta Merced y en $22,76 \text{ Mm}^3$ en el trayecto Merced-Sacramento, con desmontes de escasa importancia y solamente al atravesar el arco de Stockton entre Merced y Sacramento, para pasar de la cuenca del San Joaquín River a la del Sacramento River (Figura 7).

A la salida de la estación de Merced, el trazado cruza los Merced River y Tuolumne River, después de salvar Bear Creek y antes de llegar a la estación de Modesto. A continuación pasa sobre los Stanislaus River y Calaveras River, a la altura de Stockton. El Mokelumne River y el Consumnes River, afluente del anterior, los cruza el trazado en las proximidades de Lodi, antes de su desem-

istence of any major reliefs determine the whole line's grade, with reduced earth movement, with a deficit of 2.44 Mm^3 on the alignment to Merced and 22.76 Mm^3 on the Merced-Sacramento alignment, with minor cuttings and only when crossing through the Stockton arch between Merced and Sacramento, to move from the San Joaquin River basin to the Sacramento River's (Figure 7).

At the exit to Merced station, the alignment crosses the Merced River and Tuolumne River, after crossing over Bear Creek and before arriving at Modesto station. It then runs over the Stanislaus River and Calaveras River, at Stockton. The alignment crosses the Mokelumne River and the Consumnes River, a tributary of the former, in the vicinity of Lodi, before



FIGURA/E 8. Puente Colgante sobre el Stanislaus River / Suspension Bridge over Stanislaus River.



FIGURA/E 9. Túneles Urbanos en la ciudad de Sacramento. Coincidencia en Roseville de las LAV a Fresno ("Stockton Arch") y a San Francisco ("Bay Crossing") / Urban Tunnels in Sacramento city. Coincidence in Sacramento, Roseville, of the HSRL to Fresno ("Stockton Arch") and HSRL to San Francisco ("Bay Crossing").

bocadura en el río Sacramento a través del área del delta. Todos estos ríos los salva el trazado con puentes arco de 200 m de luz, a excepción del puente sobre el Stanislaus River, que lo hace con un puente colgante de 800 m de luz en su vano principal (Figura 8).

A la salida del PAET de Elk Grove (de funcionalidad muy importante para la explotación), la traza de la línea de alta velocidad entra en el único túnel (Figura 9) de esta HSRL, túnel urbano de 24,7 Km, en una gran curva centro derecha que describe el trazado para coincidir en alineación con la LAV desde San Francisco, dirección a Reno (Nevada), en la gran terminal de Sacramento-Roseville, pk 290 de la LAV Fresno-Sacramento (Roseville) y en el 455 de la LAV Fresno-San Francisco-Sacramento (Roseville).

La Tabla 2 resume las principales características (entre las cuales se han resaltado las anteriormente dichas) de la Línea Fresno-Sacramento y las de sus trayectos Fresno-Merced y Merced-Sacramento en la "Alternativa Stockton Arch" del Proyecto FARWEST.

running into the river Sacramento through the delta area. The alignment passes over these rivers on a 200 m span arch bridge, except for the bridge over the Stanislaus River which is a suspension bridge with an 800m span at its main span (Figure 8).

At the exit of the Elk Grove TSAP (which its functionality is very important for the train operation), the high speed line enters the only tunnel (Figure 9) of this HSRL, a 24.7 km long urban tunnel on a large centre right bend the alignment describes to coincide in alignment with the HSL from San Francisco, in the Reno (Nevada) direction, in the large Sacramento-Roseville terminal, p.k. 290 of the Fresno-Sacramento (Roseville) HSL and 455 of the Fresno-San Francisco-Sacramento (Roseville) HSL.

Table 2 summarizes the main characteristics (amongst which the aforementioned have been underlined) of the Fresno-Sacramento Line and those of its Fresno-Merced and Merced-Sacramento alignments in the "Stockton Arch Alternative" of the FARWEST Project.

4. REFERENCIAS / REFERENCES

1. Lomnitz, C. and Rosembueth, E. (1976). "Seismik risk and engineering decisions". ISBN 0-444-41494-0 Elsevier Science Publishers BV. Amsterdam, The Netherlands.
2. Howard, Arthur D. (1979) " Geologic History of Middle California " ISBN 0-520-03874-6 University of California Press. Berkeley, California U.S.A.
3. Waggoner, P.E. (1990) " Climate Change and U.S. Water Resources " American Association for the Advancement of Science, New York, U.S.A.
4. Arrojo, P. y Naredo, J.M. (1997) "La gestión del agua en España y California" Bakeaz Coagret. Vitoria, Spain.
5. Díaz del Río, M. (2003) "MOU". *EL PAIS*, 11 de Julio de 2003; *EXPANSION*, 9 de Julio de 2003 y *CINCO DIAS*, 8 de Julio de 2003.
6. Fort, L. (2004) "Safety in High Speed Railway Tunnels" ISBN 84-89456-23-2 2nd Edition (Presented in Praga) Cersa. Madrid, Spain.
7. Stein, Ross S. (2008) "The Uniform California Earthquake Rupture Forecast, Versión 2 " California Geological Survey and Southern California Earthquake Center U.S. Geological Survey, Menlo Park. California, U.S.A.

ALTA VELOCIDAD FERROVIARIA EN CALIFORNIA (USA): CUARTA PARTE (IV) FRESNO-SACRAMENTO (ROSEVILLE)
 HIGH SPEED RAILWAY IN CALIFORNIA (USA): FOURTH PART (IV) FRESNO-SACRAMENTO (ROSEVILLE)

		PHASE I CALIFORNIA HIGH-SPEED TRAIN PROGRAM (CHSTP)		OTHER PHASES CALIFORNIA HIGH-SPEED TRAIN PR (CHSAP)		"Stockton Arch" HSRL		CALIFORNIA HIGH-SPEED RAIL SYSTEM	
Units	Sections	Section II		Phase I Extension Section VI		Fresno		TOTAL SYSTEM	
	Same Charac.	Fresno-Merced		Merced-Sacramento		Sacramento		CHSR	
Mile	Total Length Section	81.8	(7.89%)	188.7	(14.87%)	180.2	(22.52%)	800	(100.00%)
Mile (%)	Length of Cut & Fill areas	80.3	(98.79%)	83.2	(79.53%)	153.8	(85.17%)	483	(60.36%)
Mile (%)	Overall Length of Tunnels	0		15.5	(13.09%)	15.5	(8.62%)	253	(31.56%)
Mile (%)	Overall Length of Viaducts	1.2	(1.22%)	8.9	(8.30%)	11.2	(6.26%)	66	(8.07%)
Internal Station	Localisation of Int Station	-		MERCED		MERCED/MERCED		GILROY/MERCED / OCEANSIDE / MADERA / VALLEJO	
Number (E/Line)	TSAP/PR (PAET/BR) / (Line + Station)	3	(1+2)	5	(4+1)	8	(5+3)	39	(22+17)
Mile/h	Average Speed	100		100		100		170	
Mio ³	Earth Moving (Overall section)	7.94		31.88		38.88		272.22	
Mio ³	from excavation	2.75		2.74		3.49		34.75	
Mio ³	from fill	5.19		29.14		35.39		237.47	
Mio ³	from tunnels	0		3.40		3.40		34.79	
Mio ³	after compaction (except specific)	-2.44		-19.38		-21.82		-65.14	
Mio ³	Deficit (-)	-2.44		-22.78		-25.23		-151.88	
Mio ³	Excess to dump (+)	3.08		3.40		3.40		35.91	
Number	Overall tunnels by section	-		1		1		81	
nb (Mile)	Long tunnels (> 1.2 Mile)	-		1 (15.4)		1		27 (212.48)	
nb (Mile)	Short tunnels (< 1.2 Mile)	-		-		-		4 / 6	
Mile	Length of long tunnels	-		15.4		15.4		#/VALOR	
m ²	Construction works (Overall)	24.818		238.325		263.140,00		1.872.118	
nb-m ²	Viaducts	4	18.000	7	234.000	11,8	252.800,0	74	1.491.900
nb-m ²	Others Bridges	9	6.818	14	4.325	23,8	11.800,0	129	88.918
nb-m ²	Arch (200m span) bridges	1	3.000	9	27.000	10,8	38.800,0	46	136.000
nb-Mile	Suspension (300 m span) bridges	0	-	1	1	1	1	13	17.58
M\$	Construction budget (A+B+C+D+E+F+G)	882	(2,40%)	2.832	(6,42%)	3.798	(10,87%)	34.820	(100,00%)
M\$	Earth moving (a)	139		490		629		3.891	
M\$	Tunnels (b)	0		888		888		15.212	
M\$	Construction works (c)	31		578		609		6.748	
M\$	A - Infrastructure (a+b+c)	169		1478		1525		25.781	
M\$	B - Overstructure	237		349		585		2.794	
M\$	C - Equipments	287		427		714		3.424	
M\$	D - Environmental Protection	13		49		62		578	
M\$	E - Design, G/C, Management	18		89		87		802	
M\$/Mile	Unit cost (included Stations)	13,89		24,71		21,61		43,90	
FOM M\$/Mile	Unit efficiency Cost (FOM Ministry Spain Ref.2010)	15,77		15,77		15,77		24,38	
Mark	Relief-Type-Nature	F - 2 - #u		F - 2 - #u		F-2-#u		- 2 -	
M\$/Mile	Supplement FOM by big span Viaducts & long tunnels	(B) - / - (Tu)		(B) 1,49 / 3,56 (Tu)		(B) 0,98/3,66 (Tu)		(B) 4,88/11,17 (Tu)	
M\$/Mile	Average Overall FOM Cost unit	15,77		22,82		26,41		42,15	
M\$	F - Supplement Construction budget by Stations & Building TSAP	120		80		290		1.467	
M\$	G - Supplements Construction budget by Equip/Env/Design, GC, Manage for Stations & Building TSAP	9		4		13		92	
M\$	Overall Cost Line / Stations	734	129	2.840	84	3.572	213	33.321	1.498

TABLA/E 2. Características de la Línea Fresno-Sacramento. Trayectos Fresno-Merced y Merced-Sacramento (Proyecto FARWEST - Miles y M\$) / CHSRs- Summary (FARWEST Project- Miles and M\$).

- Benson, S; Averbuck, A and Balfour, A.C. (2009) "California" ISBN 978-84-08-08289-7 Lonely Planet. Barcelona, Spain.
- Fort, C. (2010) "Caracterización geotécnica de base de los suelos de España". DEA ETSICCP Madrid, Spain.
- Fort, L y Fort, C (2011) "Earth Moving Geoenvironmental workability in California" Geocongress 2012. Oakland, California, U.S.A.
- Fort, L y Fort, C (2011) "Soil reinforcement vegetation effect. Analysis applied to the earth moving volume of the California High Speed Railway Sistem" International Symposium on Ground Improvement IS-GI 2012. Brussels, Belgium.
- Díaz del Río, M ; Fort, L y Fort, C (2011) "Anteproyecto /Preliminary Design LAV Fresno-San Francisco CHSRs Golden Gate Alternative".

EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 63
Año de edición: 2012
P.V.P.: 7€

La exposición y el catálogo Puentes Arco en España en la que de forma monográfica se aborda por primera vez en CE-HOPU el tema de los puentes, pretende mostrar al gran público un conjunto de realizaciones que servirán de hilo conductor para recorrer un capítulo esencial de la historia de la ingeniería. Con un enfoque didáctico, y a la par riguroso, que pueda llegar a una gran diversidad de público, se cuenta para ello con las piezas de la Colección de Maquetas de Historia de las Obras Públicas del CE-HOPU-CEDEX, que constituye un recurso de gran potencial figurativo. La exposición y su libro, tratándose de una muestra

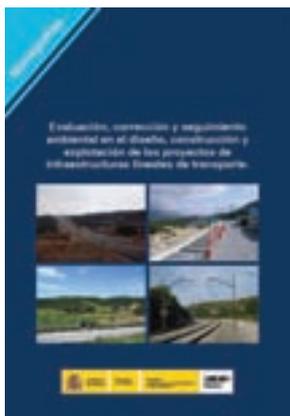
de puentes históricos, se ha organizado en función de los materiales y de las épocas quedando dividida en cinco áreas: Técnicas constructivas romanas y grandes luces; Puentes medievales; grandeza y pervivencia de los puentes de fábrica: siglos XVI-XIX; Los nuevos materiales de la época industrial: puentes de hierro y acero, y por último, Aparición y auge del hormigón estructural. Permitiendo con este recorrido hacer un viaje por la historia de las obras públicas de nuestro país.



Nº de páginas: 170
Año de edición: 2012
P.V.P.: 25€

El análisis de la seguridad hidrológica es una cuestión central en la ingeniería de presas. El fallo de las presas puede causar importantes daños materiales, además de poner en riesgo vidas humanas. A pesar de la trascendencia que tiene, los métodos de análisis de la seguridad hidrológica de las presas (tanto en fase de proyecto como en fase de explotación) han cambiado relativamente poco en las últimas décadas. En este texto se realiza una contribución metodológica al problema de la evaluación de la seguridad hidrológica de una presa, analizando el efecto laminador del embalse bajo un enfoque probabilístico. La metodología permite tener en cuenta la variabilidad de factores que intervienen tanto en la génesis de la avenida como en su laminación en el embalse. Adicionalmente, y

como resultado de la aplicación de esta metodología, se han desarrollado modelos simplificados para evaluar el efecto de la laminación de las presas y embalses ante solicitaciones hidrológicas extremas, tal que permitan orientar al proyectista en las fases previas del diseño.

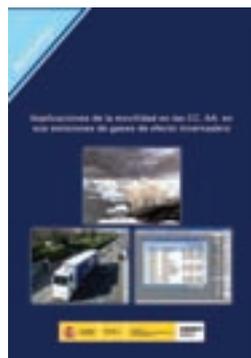


Nº de páginas: 207
Año de edición: 2012
P.V.P.: 12€

Esta monografía comprende dos manuales destinados a mejorar y normalizar la elaboración y análisis de estudios de impacto ambiental y proyectos de integración ambiental.

El primer manual lleva por título "Protocolos para la elaboración y análisis de los estudios de impacto ambiental de carreteras y ferrocarriles" y pretende establecer el alcance de los documentos asociados a la evaluación de impacto ambiental (EIA) y la metodología para su análisis. Esto se materializa en: 1) Un conjunto de instrucciones técnicas para los documentos del procedimiento de EIA de obras lineales, con las que se pretende mejorar la calidad, mediante la normalización del alcance y contenido mínimo de los documentos que se generan en el

proceso de evaluación y, sistematizar y normalizar las tareas del proceso de evaluación que realiza el órgano ambiental. Estas instrucciones se concretan en fichas de proyecto, que sintetizan la información básica del proyecto sometido a evaluación, propuesta de contenidos para la elaboración de los documentos, de especial interés para el promotor y fórmulas para el análisis de los documentos, a utilizar por el órgano ambiental y en su caso sustantivo. 2) Un manual para el desarrollo de las medidas de diseño, protección y corrección ambiental en la formulación de los proyectos de carreteras y ferrocarriles. Su objetivo es la incorporación efectiva a los proyectos de las medidas de integración ambiental y de protección, corrección y compensación de los impactos ambientales estimados en el estudio de impacto ambiental. Por su extensión, se han desarrollado en un documento independiente, incluido en la misma publicación, denominado "Manual para el diseño de medidas protectoras, correctoras y compensatorias". 3) Una serie de protocolos de análisis de los documentos de seguimiento ambiental, tanto para la obra como para la fase de explotación de la infraestructura.



Nº de páginas: 104
Año de edición: 2012
P.V.P.: 12€

La actividad económica hoy se puede evaluar siguiendo y estimando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) porque la economía tiene como soporte energías procedentes de combustibles fósiles. Las últimas décadas se han caracterizado por una dependencia absoluta de la economía del carbono y de otras energías no renovables, como la nuclear. Seguir el rastro del carbono en los distintos pueblos o regiones permite desentrañar aspectos diferentes de su realidad territorial. Así para evaluar esta huella la Unión Europea (UE) ha puesto en marcha metodologías de cuantificación de las emisiones de GEI y otros gases contaminantes conocidas como CORINE AIRE. Estos instrumentos responden a los compromisos europeos

contraídos en materia de medio ambiente para comparar la evolución de las emisiones en el conjunto de Estados miembros de la UE. En este trabajo se hace un recorrido utilizando dicha herramienta para descubrir todas las actividades productivas susceptibles de generar emisiones de GEI; lo que posibilita comparar, medir y valorar los comportamientos de los distintos territorios en el tiempo. Este documento reflexiona y valora sobre todo las actividades de generación de energía y del transporte, por tratarse de sectores económicos de mucho peso en el conjunto de las emisiones de GEI globales (30%) y con significación en los indicadores de renta. Cruzar la información de las variables vinculadas al sector del transporte posibilita no sólo asomarse a la realidad territorial, sino que permite también poner al descubierto las deficiencias de información que el sistema estadístico tiene sobre estos temas, en parte motivadas por las características de la distribución competencial que otorga la Constitución Española a las diferentes Administraciones territoriales: Estado Central, Comunidades Autónomas y Entidades Locales. A lo largo del documento se irá valorando cómo influyen las variables de renta per cápita y población en el aumento de las emisiones de GEI. Para ello, se empieza primero a describir las tendencias seguidas en España en cuanto a crecimiento de renta y población, para continuar después relacionándolo con los comportamientos de las emisiones de GEI.

Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

25 Años de la pista de ensayo acelerado de firmes del CEDEX

JAVIER PÉREZ AYUSO (*), BELÉN CADAVID JÁUREGUI (**),
JOSÉ ORENCIO MARRÓN FERNÁNDEZ (***) y OSCAR GUTIÉRREZ-BOLÍVAR ÁLVAREZ (****)

RESUMEN En enero de este año se han cumplido 25 años desde la inauguración de la Pista de Ensayo de Firmes a Escala Real del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento. Estas instalaciones están destinadas al estudio de los problemas relacionados con el dimensionamiento estructural de los firmes de carretera. Los firmes se construyen a escala real, y los ensayos se realizan de forma acelerada y con la carga controlada. Llevan utilizándose en la investigación de carreteras más de un siglo y hoy en día están más vigentes que nunca debido a la gran cantidad de campos hacia donde se abren las investigaciones actuales en esta materia, como son: el uso de nuevos materiales y métodos de construcción, la rehabilitación de firmes, etc. Desde su inauguración en 1988 se han ensayado 30 secciones estructurales y 20 capas de rodadura, los vehículos simuladores de carga han recorrido 2,8 millones de kilómetros y se han aplicado un total de 56,4 millones de cargas. Todos los resultados obtenidos han repercutido en el diseño de firmes y en las prescripciones de los materiales establecidas por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

CEDEX TEST TRACK 25TH ANNIVERSARY

ABSTRACT *The Pavement Test Track of CEDEX (Infrastructure Research Centre) have reached 25 years in January 2013 since its opening. Nowadays this kind of facility is used for the study of problems related to the structural design of road pavements. The pavement is built in real scale, and tests are performed rapidly and with controlled loads. Such facilities have been in use in the study of performance of pavements over a century and today are more relevant than ever because of the large amount of fields open to new researches in this area, including: the use of new materials and methods of construction, pavement rehabilitation, etc.. This article presents a historical journey from the first testing pavements sections in real roads to the Full-Scale Accelerated Pavement Test Track of CEDEX. Since its opening in 1988, a total number of 30 pavement sections as well as 20 surface layers types have been tested. The load simulator vehicles have travelled 2.8 million kilometers and have applied a total of 56.4 million loads. All results have affected the design and materials requirements established by the Directorate General of Roads of the Ministry of Public Works of Spain.*

Palabras clave: Pista de ensayo acelerado de firmes, Capacidad estructural de firmes, Instrumentación.

Keywords: Full scale accelerated pavement test track, Structural capacity of pavements, Instrumentation.

1. ENSAYOS A ESCALA REAL

Desde la primera pista de ensayo construida en Detroit en el año 1909 (Fotografía 1) hasta la actualidad se ha pasado por varias etapas en el campo del dimensionamiento estructural.

A partir de los años 40 se comienzan a desarrollar métodos analíticos para el dimensionamiento de los firmes y es entonces cuando surge la necesidad de disponer de una herramienta de validación, debido al gran número de variables que intervienen en el deterioro del firme y que afectan a su res-

(*) Titulado de Escuelas Técnicas de Grado Medio de Organismos Autónomos del Ministerio de Fomento. Director de Programa. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Javier.perez@cedex.es

(**) Licenciada en Ciencias Físicas. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Belen.cadavid@cedex.es

(***) Licenciado en Ciencias Químicas. Titulado superior de I+D+i. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Jmarron@cedex.es

(****) Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Centro de Estudios del Transporte del CEDEX. E-mail: Obolivar@cedex.es



FOTOGRAFÍA 1. Pista de Ensayo en Detroit (1909).

puesta ante las sollicitaciones producidas por el tráfico, como son: la temperatura, la humedad de los suelos, la velocidad de aplicación de la carga y su magnitud.

Un avance importante se produjo a comienzos de los años 60 con la realización del primer ensayo a escala real, el ensayo AASHO, que permitió obtener un método de dimensionamiento basado en el concepto del deterioro por fatiga, relacionando además los deterioros producidos por cargas de distinta magnitud. Estos resultados permitieron elaborar el sistema de paso del estado estático al dinámico, permitiendo integrar la repetición de cargas y sirviendo de tarado para los modelos analíticos existentes.

Esta situación, junto al aumento del volumen de tráfico, el coste de construcción de carreteras y las inversiones necesari-

as para su conservación, empujaron a que la mayoría de los países industrializados adoptaran las pistas de ensayo de firmes a escala real como una herramienta básica en el desarrollo de sus métodos de dimensionamiento.

Existen diferentes tipos de instalaciones con muy diferentes características y que persiguen objetivos muy dispares. Si se agruparan por su funcionalidad, habría un primer grupo en donde tendrían cabida todas aquellas pistas de ensayo en donde se estudian los problemas relacionados con los vehículos y con elementos de seguridad de la propia infraestructura. Y un segundo grupo a las instalaciones destinadas al estudio de la capacidad estructural de los firmes.

La Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX se encuentra englobada en el segundo grupo. En la Figura 1 se presenta

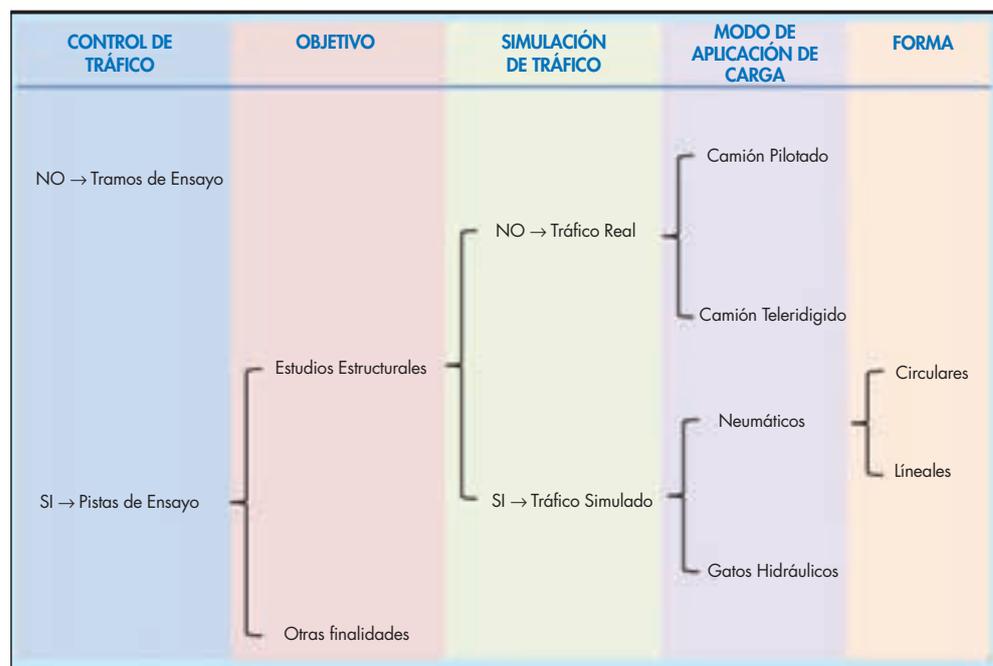
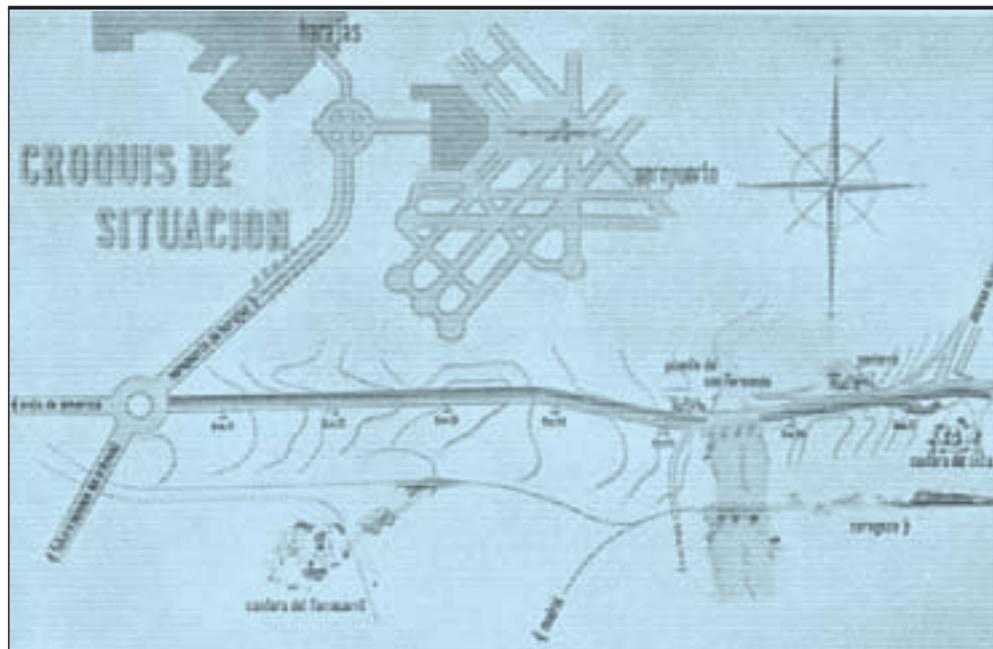


FIGURA 1. Clasificación de Pistas de Ensayo de Firmes.



FOTOGRAFÍA 2. Croquis de situación del tramo de ensayo.

cómo se clasifican dependiendo de su objetivo, de la simulación de tráfico, del modo de aplicar la carga y de su forma.

En la actualidad existen más de 40 pistas de ensayo de firmes a escala real en el mundo.

Bajo los auspicios del Comité AFD40 del TRB (Transportation Research Board) se han celebrado 4 conferencias internacionales de Ensayo Acelerado de Firmes. La primera tuvo lugar en Reno en el año 1999, la segunda en Minneapolis en el año 2004, la tercera se celebró en Madrid en el año 2008 y fue organizada por el CEDEX, y la última tuvo lugar en Davis-California el año 2012. La Pista de Ensayo Acelerado de Firmes del CEDEX ocupa un lugar importante dentro de todo el conjunto de este tipo de instalaciones, como se ha demostrado al ser el único organismo fuera de EEUU en organizar una de estas conferencias, y por ser una pista de referencia para muchos organismos internacionales.

2. UN POCO DE HISTORIA

En octubre de 1977 se autorizó la redacción del "Proyecto de Pista de Ensayo a Escala Natural" al Laboratorio de Transporte y Mecánica del Suelo "José Luis Escario" dependiente del CEDEX. Un año después se presentó el proyecto firmado por el Director del Proyecto D. Guillermo Carrillo Vargas.

La decisión sobre la construcción de una pista de ensayo coronó un largo proceso de constante interés en el comportamiento de los firmes de carretera.

Como primer eslabón se puede mencionar, el tramo de ensayo (Fotografías 2 y 3) realizado en la Carretera Nacional II, en las proximidades de Madrid, entre los kilómetros 11,255 y 17,600, bajo la supervisión de la Dirección General de Carreteras y el Laboratorio del Transporte en el año 1964. La longitud del tramo fue de unos 6,345 km, soportando una intensidad media de 13.000 vehículos diarios, con un 25 a 30% de vehículos pesados. En este tramo se destinaron 2.500 m a firmes flexibles, ensayándose 53 secciones distintas; 2.384 m se utilizaron para ensayos de firmes de hormigón pretensado y 1.484 m para firmes de hormigón tradicional. Como complemento se instaló una estación meteorológica, una báscula di-

námica, y un gran número de dispositivos para la medida de diferentes variables.

Durante los años 1968 y 1969, varios expertos de diversos países, formaron un grupo de trabajo promovido por la OCDE, cuyo tema era "Investigación sobre los métodos acelerados para estudiar la vida de los firmes de carretera", donde se estudiaron las ventajas e inconvenientes de los métodos que se usaban en aquella época.

En el año 1973 se redactó un Anteproyecto de Pista Circular de Ensayo en la Cátedra de Caminos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Madrid, siendo su autor Juan Antonio Fernández del Campo.

El citado anteproyecto consistía en una pista circular de ensayo, de 12 m de diámetro, con una sección de 2 m de anchura por 1,75 m de profundidad. El mecanismo de prueba estaba formado por unas ruedas unidas mediante un brazo a un eje central giratorio. La pista estaba cubierta aunque permitía realizar pruebas a la intemperie, disponiendo de una instalación de rayos infrarrojos para simular los efectos de la acción solar, así como de otra instalación que permitía ejecutar pruebas de variación del nivel freático. Como instalación auxiliar se proyectó un edificio de laboratorio y oficinas (Figura 2).



FOTOGRAFÍA 3. Vista general del tramo de ensayo.

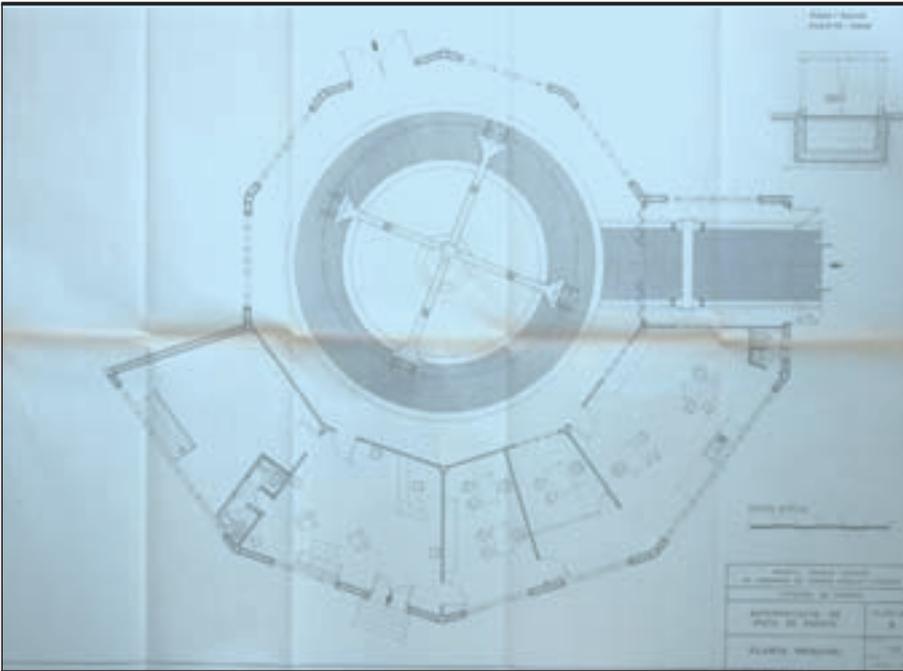


FIGURA 2. Anteproyecto de Pista Circular de Ensayo de 1973.

Las razones de tipo general que aconsejaban el estudio a escala real del comportamiento de los firmes en esos momentos fueron entre otras:

- La tendencia mundial puesta en práctica por la AASHO con sus tramos de ensayo.
- La dificultad de transferencia de los resultados de laboratorio a la realidad.
- La transcendencia económica del dimensionamiento de firmes dentro del conjunto de una red de carreteras.
- La necesidad dentro del campo de la investigación de la puesta a punto de nuevas técnicas de fabricación y materiales.

A estas razones hay que añadir las particulares de la realidad española de la época:

- Fuerte incremento de tráfico en toda la red.
- La influencia de los distintos tipos de clima.
- Alto porcentaje de vehículos pesados en la composición del tráfico.
- La autorización de las cargas de 13 t por eje.

Muchas de las razones que justificaban la construcción de una pista de ensayo a escala real siguen estando vigentes.

Desde el primer proyecto del año 1978 (Figura 3) se sucedieron múltiples variaciones hasta llegar al diseño final de la pista que se inauguró en 1988.



FIGURA 3. Plano del proyecto de 1978.

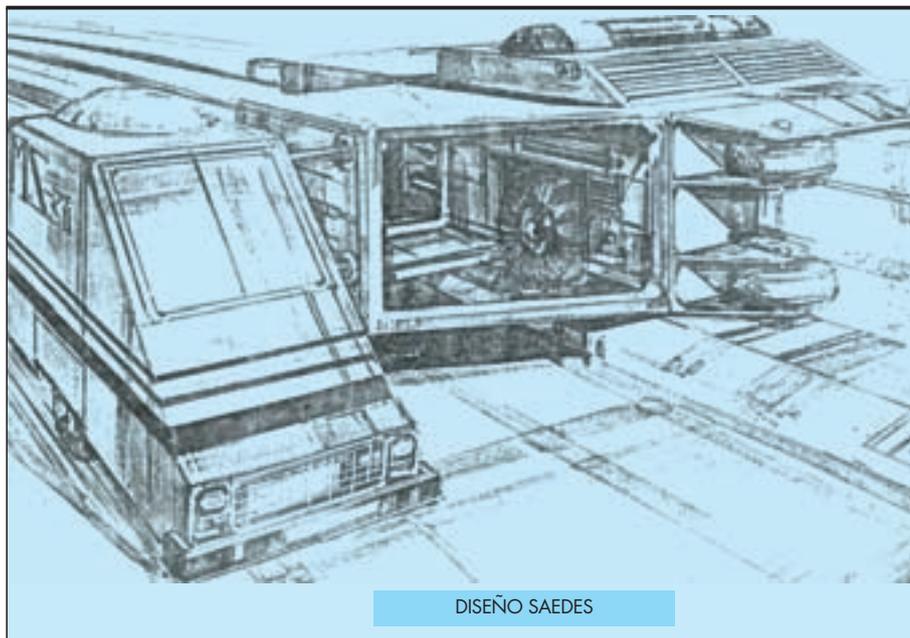


FIGURA 4. Prototipo del proyecto 1984.

También se realizaron varios proyectos de vehículos simuladores de carga (Figuras 4 y 5) hasta la construcción del primer vehículo en los años 80.

Desde que surgió la necesidad de una pista de ensayo hasta su inauguración participaron un buen número de técnicos con mayor o menor responsabilidad en el proyecto y construcción, hay que destacar la participación de D. José Luis Escario como precursor de los ensayos a escala real de firmes en España en el año 1962, D. Guillermo Carrillo Vargas, D. Juan Carlos Fernández de Castro y D. Ramón Rodil Sierra como integrantes del equipo de Dirección de las obras de construcción de la instalación, D. Jaime Tamarit Rodríguez como responsable del diseño del sistema de adquisición de datos mediante instrumen-

tación, D. Aurelio Ruiz Rubio y D. Recaredo Romero Amich como responsables de los ensayos y a D. José Luis Elvira Muñoz como Director del entonces llamado Centro de Estudios de Carreteras en el momento de su inauguración.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA PISTA DE ENSAYO

3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La Pista de Ensayo de Firmes del CEDEX está ubicada en las instalaciones del Centro de Estudios del Transporte en la Autovía de Colmenar Viejo Km 18,2, El Goloso (Madrid).

Está considerada como de tipo lineal puesto que las zonas de ensayo se encuentran en recta aunque su configuración es



FIGURA 5. Prototipo del proyecto 1984.



FOTOGRAFÍA 4. Vista de los tramos rectos y circulares de la pista de ensayos.

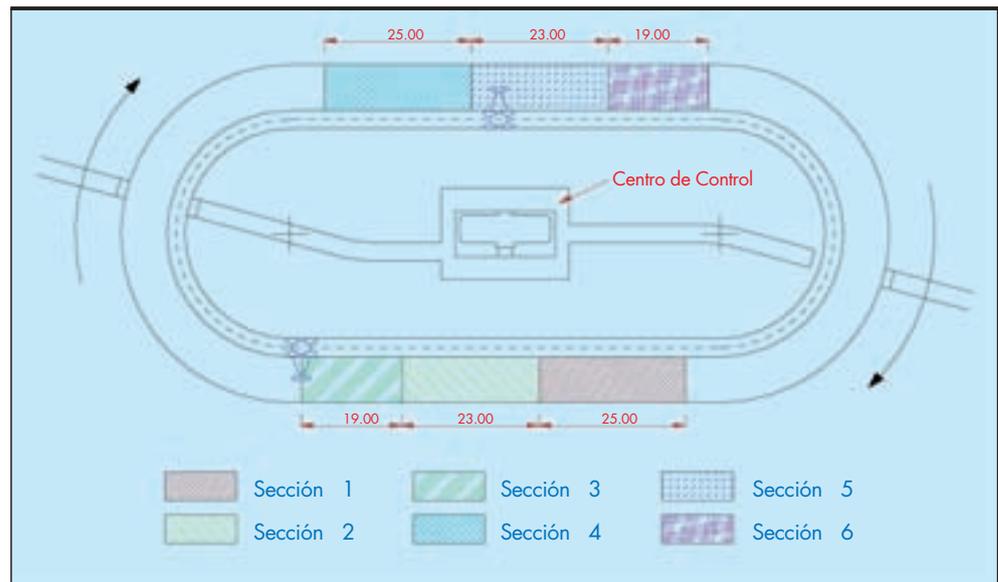


FIGURA 6. Secciones en los tramos rectos de la Pista.

mixta, mezcla entre las lineales y las circulares. Se eligió esta configuración para que reuniera las ventajas de ambas tipologías de pistas de ensayo. Consta de dos tramos rectos de 75 metros unidos por dos tramos curvos de 25 metros de radio (Fotografía 4). La longitud total recorrida por los vehículos de ensayo en cada vuelta es de 304 metros. Las secciones completas de firme se construyen en los tramos rectos de la pista, como sucede en las pistas lineales, mientras que los tramos curvos dan continuidad a la carga, de forma que el sentido de aplicación es siempre el mismo, al igual que en las circulares, y aumenta el rendimiento de ensayo con respecto a las pistas lineales gracias a la forma de circuito cerrado. Los tramos curvos se emplean para ensayos de capas de rodadura, tratamientos superficiales, pinturas, etc.

En cada tramo recto se han construido tres secciones diferentes (Figura 6). La longitud destinada a ensayo en cada uno de los tramos es de 67 m, correspondiendo a cada sección 25, 23 y 19 metros respectivamente, quedando el resto destinado a zona de transición y enlaces. Estos tramos rectos se encuentran unidos entre sí a través de los tramos curvos.



FOTOGRAFÍA 5. Cubeta de hormigón.

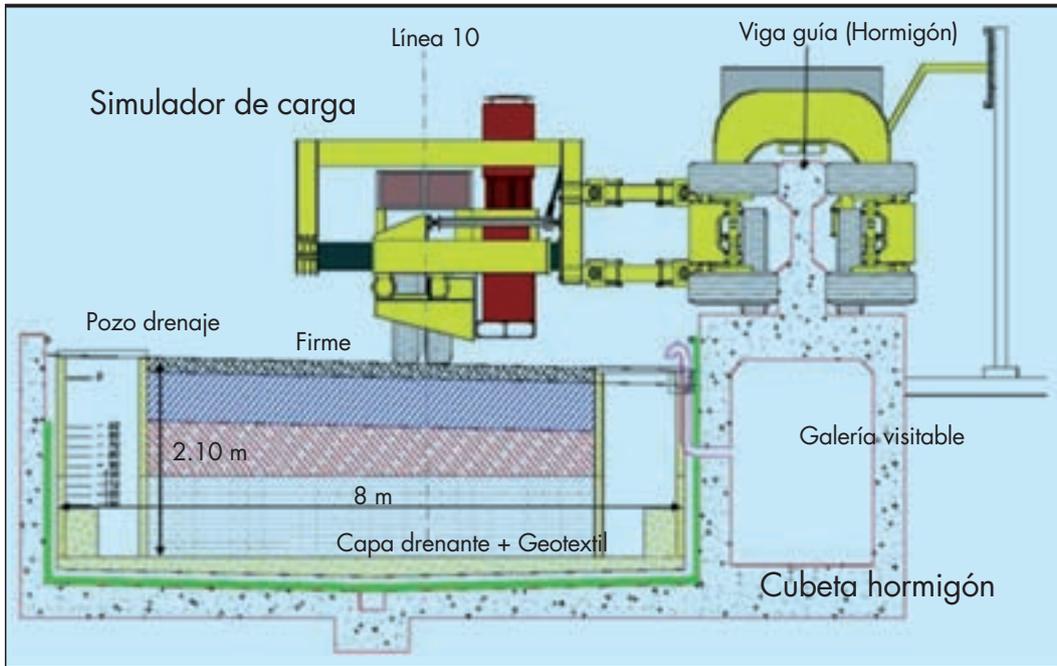


FIGURA 7. Sección transversal de un tramo recto.



FOTOGRAFÍA 6. Construcción de las secciones con maquinaria convencional.

Mientras que los tramos en curva se apoyan en unas losas de hormigón, en los tramos rectos se ha dispuesto una cubeta de hormigón armado en forma de U (Fotografía 5 y Figura 7) de 8 m de ancho por 2,1 m de profundidad, lo que permite la construcción de terraplenes de 1,25 m de altura como mínimo, el control de su nivel freático, y la ejecución de los firmes con maquinaria convencional de carreteras (Fotografía 6). Esta cubeta confiere a todas las secciones un aislamiento del terreno natural así como un soporte homogéneo para todas las secciones de forma que los resultados de los ensayos pueden ser comparados entre sí.

En los tramos rectos existe una estructura metálica cubriendo las secciones (Fotografía 7), que puede desmontarse. De esta forma se puede controlar el nivel freático, permitiendo la entrada de agua de una forma controlada, y el aislamiento de las secciones de la radiación solar directa.

La aplicación de las cargas se lleva a cabo a través de los vehículos simuladores de tráfico (Fotografía 8), aunque la instalación está preparada para albergar hasta tres vehículos simultáneamente. En estos vehículos se distinguen dos partes: el carretón de guía y el carretón de carga.



FOTOGRAFÍA 7. Vista de la cubierta en un tramo recto.



FOTOGRAFÍA 8. Vehículos simuladores de tráfico.

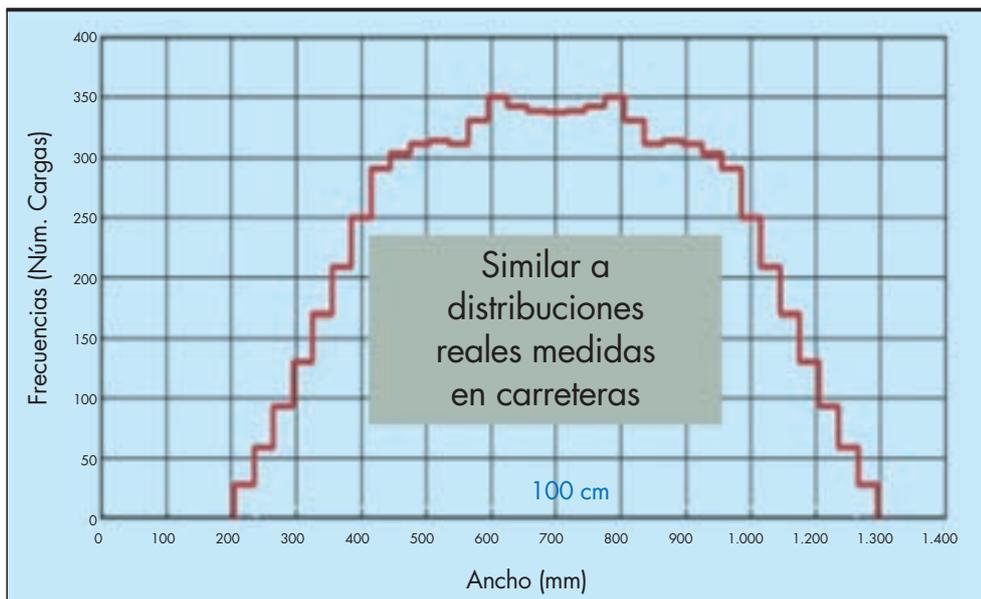


FIGURA 8. Distribución transversal de cargas.

El carretón de carga aplica ésta por gravedad, mediante un semieje de vehículo pesado. La carga puede variarse entre 5,5 y 7,5 t. Tanto la suspensión (de tipo neumático) como los neumáticos (con rueda balón o ruedas gemelas) son convencionales. La velocidad de circulación durante el ensayo es de 40 a 50 km/h, con una máxima de 60 km/h. Por otro lado, este carretón es autopropulsado por medio de un motor eléctrico, y genera el movimiento del conjunto. Con esto se intentó recoger la situación más general y agresiva de las condiciones de carga, que corresponde a la de ruedas tractoras.

El carretón guía rueda por la viga carril de hormigón, abrazado a ella y dirigiendo la trayectoria del carretón de carga. Ambos están unidos por articulaciones que permiten que el vehículo de carga se mueva en un plano normal a la dirección del desplazamiento. La disposición de las articulaciones le permite adaptarse perfectamente a los cambios de trayectoria en las curvas.

Los neumáticos pueden situarse de forma automática en 7 posiciones transversales diferentes, por medio de un gato hidráulico que se acciona en movimiento, produciendo una banda rodada de 1,0-1,4 m de anchura, y consiguiendo que la

distribución de las pasadas siga una curva normal que responde a distribuciones reales medidas en carretera (Figura 8).

Los vehículos han ido evolucionando a través de los años, mejorando su estructura y su sistema de control. Durante el primer ensayo realizado en la pista, año 1988, se utilizó un único vehículo prototipo (Fotografía 9).

Gracias a la experiencia adquirida durante el primer ensayo, se llevaron a cabo mejoras en el prototipo inicial hasta llegar a los vehículos actuales, de forma que se ha duplicado la capacidad de aplicación de carga de la pista.

Durante la construcción de los firmes se van colocando sensores embebidos en las diferentes capas con el propósito de la obtención de las magnitudes de las variables tensodeformacionales del firme que constituyen la respuesta del mismo ante el paso de la carga. De esta forma se puede llevar a cabo la determinación de la variación de la respuesta del firme con las condiciones ambientales y de carga (velocidad de la aplicación de la carga, posición respecto del punto de medida, temperatura, etc.). Los sensores instalados se escogen dependiendo de las características de los materiales que componen la estructura del firme (Fotografía 10).



FOTOGRAFÍA 9. Primer vehículo utilizado en la instalación.



FOTOGRAFÍA 10. Ejemplo de sensores embebidos en los firmes.

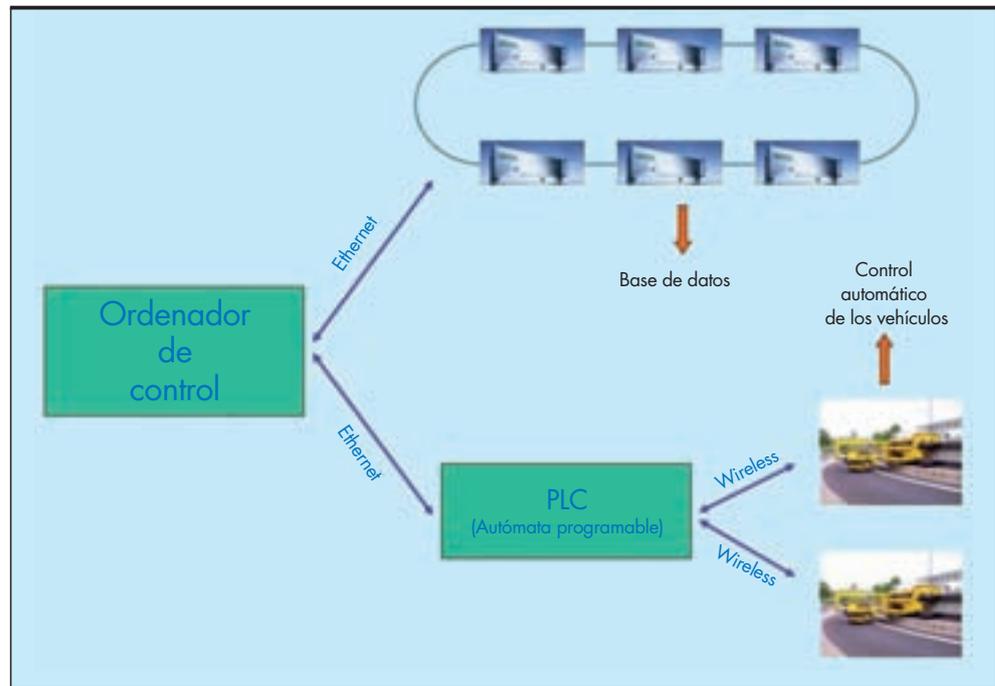


FIGURA 9. Sistema automático de control de la instalación.

La instrumentación colocada se acondiciona y mide a través del sistema de control. Uno de los puntos fuertes de esta instalación es el sistema adquisición de datos de la instrumentación colocada en los firmes. Este sistema ha sido el ejemplo a seguir por otros países en sus instalaciones de este tipo. Gran parte de su éxito reside en su buena planificación inicial realizada en los años 80, que ha permitido su evolución para poder incorporar equipos de acondicionamiento y medida de última generación, lo que permite que el sistema se encuentre completamente actualizado y con las capacidades de almacenamiento y procesado de los tiempos actuales.

3.2. SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE LA INSTALACIÓN

En el diseño y explotación de la pista se le ha dado una enorme importancia a la automatización del proceso, con el objetivo de obtener un funcionamiento continuado. También es importante señalar que toda la instalación, y especialmente los vehículos y su sistema de gobierno, son prototipos proyectados, construidos e instalados ex profeso en España con tecnología íntegramente europea (Figura 9).

3.2.1. Sistema de control de los vehículos

La instalación dispone de un sistema automático de gobierno y control de los vehículos, situado en el edificio localizado en el interior de la pista, el Centro de Control. El sistema está basado en un programa informático desarrollado específicamente y que permite el funcionamiento las 24 horas del día sin necesidad de presencia de personal. El rendimiento de la instalación es de unas 100.000 cargas al mes.

El sistema de control de los vehículos se encarga de dar las órdenes mediante un autómata programable situado en el Centro de Control, a los vehículos. Estos, cuentan con otros dos autómatas que se encargan de ejecutar estas órdenes recibidas y controlar una serie de alarmas que avisan del estado del vehículo. Cuando alguna de las alarmas se activa, se envía la orden al autómata del Centro de Control para que lleve a cabo la acción pertinente (paro de los vehículos, reducción

de velocidad, información al usuario, etc.). La comunicación entre los autómatas situados en los vehículos y el autómata situado en el Centro de Control ha ido evolucionando con el paso del tiempo. En un principio esa comunicación era por radio, se pasó a una comunicación por cable debido fundamentalmente a las interferencias que se producían, y en la actualidad la transmisión se lleva a cabo a través de una red wifi.

3.2.2. Sistema de control de la instrumentación

Por otro lado, una parte importante de la pista de ensayo es su sistema de adquisición de datos, que ha ido evolucionando con el tiempo, desde sus inicios en 1988 con los equipos disponibles en aquella época, hasta la última actualización y mejora del sistema, en el año 2012.

Al bloque de adquisición de datos llegaban las señales de los sensores en analógico y debían ser convertidas a digital a través de un convertidor A/D. Para poder llevar a cabo la conversión de todas las señales, estas eran multiplexadas antes de pasar por el convertidor, estas placas multiplexoras eran de 16 canales, pudiendo leer hasta 256 canales.

Una vez convertidas las señales analógicas en digitales se almacenaban en un micro situado en la planta sótano del Centro de Control, que era el encargado de llevar a cabo el proceso de medida con los sensores. Debido a la poca capacidad que tenían entonces los microprocesadores, se debían sacar los ficheros de texto generados en cada medida mediante un disquete de tipo floppy y se almacenaban de esta manera antes de ser volcados en una base de datos.

Actualmente el sistema de adquisición ha sido mejorado completamente. Se han sustituido los antiguos acondicionadores por dispositivos de adquisición que llevan asociada la parte de acondicionamiento y la parte de adquisición y almacenamiento en el mismo dispositivo. De esta forma, las señales son acondicionadas y convertidas a digital en el punto más cercano a los sensores, y la información puede ser transmitida a través de Ethernet sin perder señal a una mayor distancia. Esto ha permitido también duplicar el número de sensores

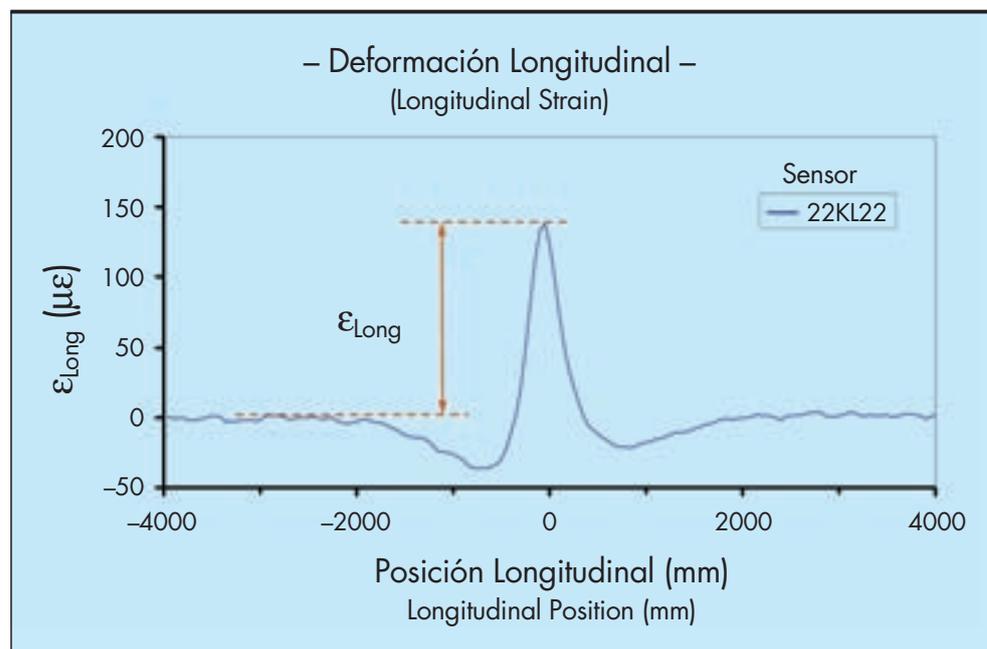


FIGURA 10. Ejemplo de curva registrada y almacenada al paso del vehículo.

que pueden ser instalados y medidos en la Pista de Ensayo (Figura 10).

El nuevo sistema de control de la instrumentación se lleva a cabo uniendo físicamente los dispositivos a través de Ethernet, y este a su vez se encuentra unido al ordenador que posee el sistema informático que gestiona el funcionamiento tanto del control de los vehículos como el de la instrumentación.

Para la adquisición de los valores de la temperatura del firme se han instalado unos autómatas que se encargan exclusivamente de recoger y almacenar en el ordenador de control, cada 5 minutos, los valores de los sensores de temperatura colocados en el firme. Se dispone de una traza cuasi continua de la temperatura del firme a distintas profundidades y de la temperatura ambiente, muy útil a la hora de desarrollar modelos o estudios mucho más detallados.

4. ENSAYOS REALIZADOS

Desde la inauguración oficial de la instalación en enero de 1988 hasta la actualidad los vehículos simuladores de tráfico han recorrido más de 2,8 millones de kilómetros y han aplicado más de 56,4 millones de cargas, equivalentes cada una a un semieje de 13 t. Sin tener en cuenta los períodos en los que los vehículos simuladores de carga no circularon, por construcción de secciones, labores de mantenimiento, cambios en la instalación, etc., por la pista de ensayos de firmes han circulado de media más de 90 vehículos pesados por hora.

Los principales objetivos que persiguen los ensayos realizados en la pista de ensayo han sido fundamentalmente:

- La comparación de secciones de firmes sometidas al paso controlado de una carga tipo.

Se ha llevado a cabo estudiando la evolución de los deterioros que se han producido con la repetición de cargas, obteniendo finalmente una lista ordenada de las secciones según el número de aplicaciones de carga que habían soportado hasta el fallo. Para realizar la clasificación de las secciones estructurales ensayadas se mar-

can unos criterios de fallo para cada indicador del estado funcional o estructural de las secciones. Una vez marcados estos criterios de fallo únicamente hay que ordenar las secciones en función del número de aplicaciones de carga de cada una de ellas hasta alcanzar dicho nivel. De esta forma se puede determinar la clasificación de las secciones de ensayo desde un punto de vista funcional y estructural.

- Validación y calibración de modelos de dimensionamiento de firmes y desarrollo de nuevos modelos.

A partir de los datos obtenidos con la instrumentación, se ha comprobado la validez de los modelos analíticos y al mismo tiempo la evolución en el tiempo de los diferentes mecanismos de deterioro en función de las condiciones ambientales y las repeticiones de cargas.

En estos primeros 25 años de funcionamiento todos los ensayos realizados fueron solicitados y financiados por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento. A continuación se resume cada uno de ellos.

4.1. PRIMER ENSAYO: "PRIMER ENSAYO EN LA PISTA A ESCALA NATURAL"

En el primer ensayo la investigación se centró en las secciones 321 y 322 del catálogo de la Instrucción 6.1y 2-IC, Secciones de firme, vigente en el año 1988. La primera de ellas tenía un gran espesor de material granular (25 de zahorra artificial más 25 cm de zahorra natural) y 15 cm de mezcla bituminosa. La segunda tenía un espesor menor de material granular (25 cm de zahorra artificial) y mayor de mezcla bituminosa (18 cm). Se analizaron variantes de estas secciones manteniendo los mismos espesores y tipos de las capas inferiores, pero variando el espesor de las capas bituminosas.

El objetivo principal del ensayo fue comparar la vida de servicio de dos secciones del catálogo propuestas como soluciones alternativas para unas mismas condiciones de proyecto. Se trataba también de determinar la sensibilidad de estas secciones a los decrementos de espesor de la capa de mezcla bituminosa (Figura 11).

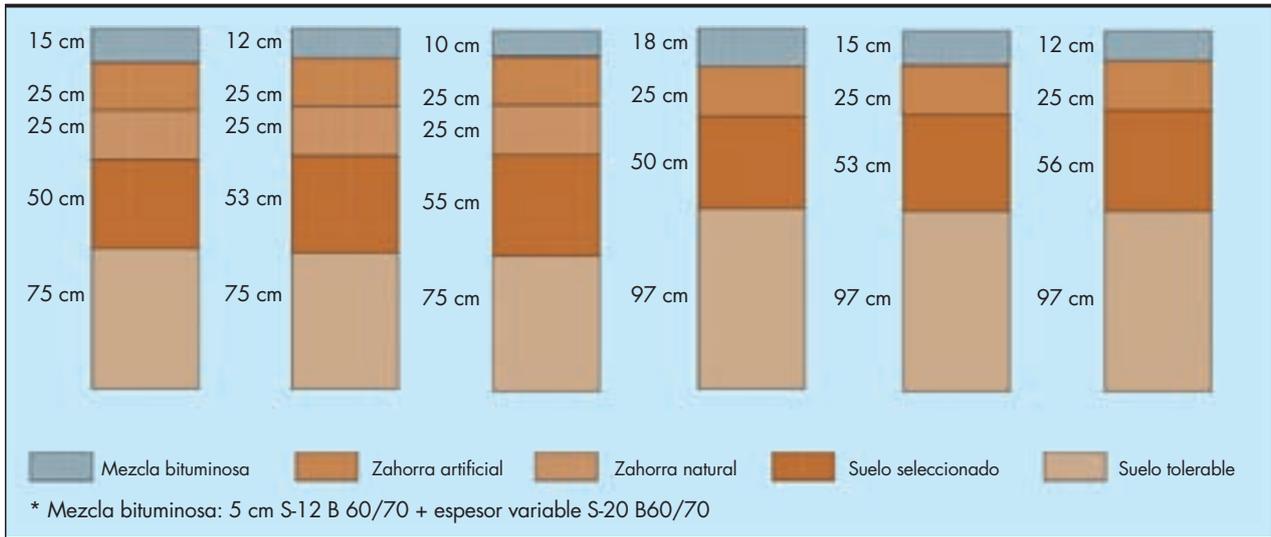


FIGURA 11. Secciones de firme del primer ensayo de la pista.

Los deterioros considerados en este ensayo fueron:

- Variación de regularidad superficial, obteniendo los perfiles transversales de los distintos tramos (Figura 12).
- Fisuración de la superficie de rodadura mediante inspecciones visuales periódicas.
- Pérdida de capacidad de soporte asociada a la medida de deflexión con deflectómetro de impacto.

4.2. SEGUNDO ENSAYO: "ENSAYOS EN LA PISTA DE FIRMES A ESCALA REAL (1994-1996)"

Como objetivo principal del ensayo se estableció la determinación de la vida de servicio relativa de las secciones con pavimento de mezcla bituminosa apoyado sobre diferentes bases:

zahorras, suelocemento o gravacemento. Asimismo se analizó el procedimiento seguido en el catálogo para la disminución de espesor de los firmes al pasar de la explanada tipo E2 a la tipo E3 (Figura 13).

Con el fin de acelerar el ensayo se hizo en las condiciones más desfavorables en cuanto al nivel freático, situando éste a 80 cm de la superficie de la explanada.

Se realizaron más de una decena de auscultaciones de los firmes ensayados, con el objetivo de evaluar el deterioro de la regularidad superficial transversal, de la capacidad de soporte y de la fisuración superficial. Se añadieron ensayos para determinar la regularidad longitudinal midiendo el Índice de Regularidad Internacional (I.R.I.), además se midió la evolución de la textura superficial y la resistencia al deslizamiento con el paso repetido del tráfico.

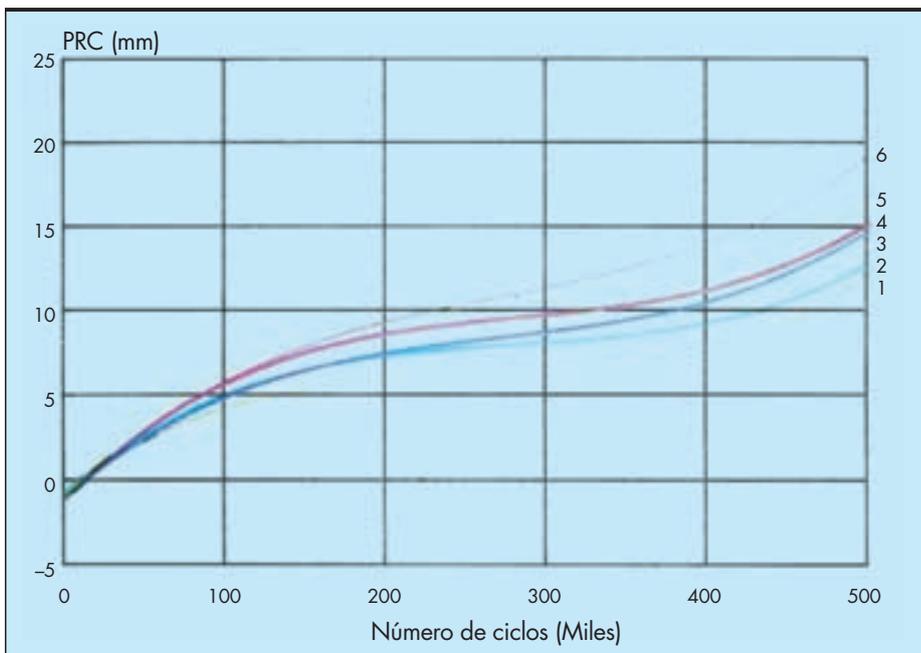


FIGURA 12. Curvas de evolución de profundidad de rodadura con número de ciclos.

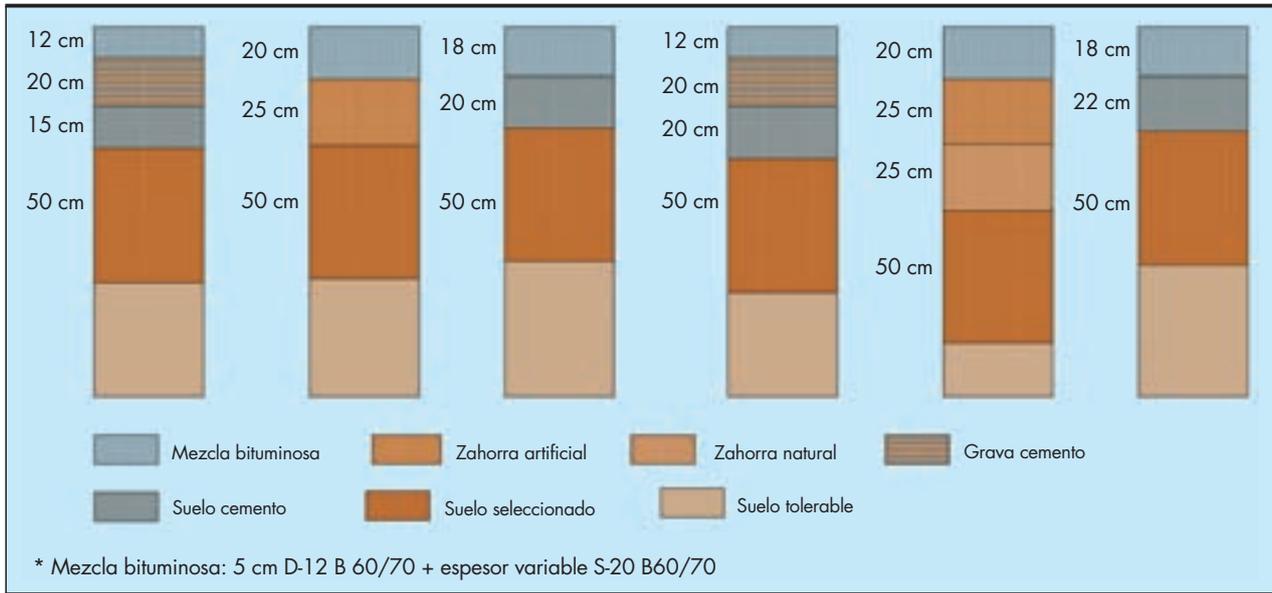


FIGURA 13. Secciones de firme del segundo ensayo de la pista.

Los tramos curvos no están proyectados para el análisis estructural de los firmes porque la trayectoria del vehículo induce agrietamiento superficial pero no estructural por esfuerzos tangenciales. Dadas las características de estos tramos, en este ensayo las zonas de curva se aprovecharon para la realización de un ensayo de durabilidad de diferentes materiales utilizados en las marcas viales.

Los materiales se aplicaron transversalmente y se ensayaron: diversos tipos de pinturas, plásticos de aplicación en frío, termoplástico de aplicación en caliente, añadiendo en todos los casos tanto microesferas de vidrio convencionales como tratadas, y cintas prefabricadas.

Se determinó la evolución de las marcas viales en función del número de pasadas del vehículo y cómo afectaba su paso y las condiciones ambientales a los diferentes productos. En la evaluación periódica se incluyó: el coeficiente de resistencia al deslizamiento y el grado de deterioro, el coeficiente de retroreflexión para determinar la visibilidad nocturna y la medida de visibilidad diurna.

4.3. TERCER ENSAYO: "ENSAYOS EN LA PISTA DE FIRMES A ESCALA REAL (1ª FASE)"

Se enfocó al estudio de las secciones de explanadas contempladas en la Instrucción 6.1 y 2-IC. Para ello, se ensayaron seis secciones con diferente tipo de explanadas y la misma capa de mezcla bituminosa (Figura 14). Una de las seis explanadas, que se tomó como tipo o referencia, puede clasificarse como de tipo E3. La diferencia entre las seis secciones se concretó en los espesores de las capas y los materiales que constituyen la coronación de la explanada, entre el terraplén y el firme. En una de las secciones se colocó un geotextil de refuerzo antes de la coronación para separar el suelo tolerable del suelo seleccionado. La experimentación de esta primera fase se inició en los primeros meses de 1998 y se prolongó hasta diciembre de 2000.

En este ensayo, se dispuso la misma mezcla bituminosa tipo semidensa fabricada con betún asfáltico para todas las secciones, de manera que fuese lo suficientemente flexible para seguir las deformaciones verticales esperables en las diferentes



FOTOGRAFÍA 11. Ensayo de marcas viales en la pista.

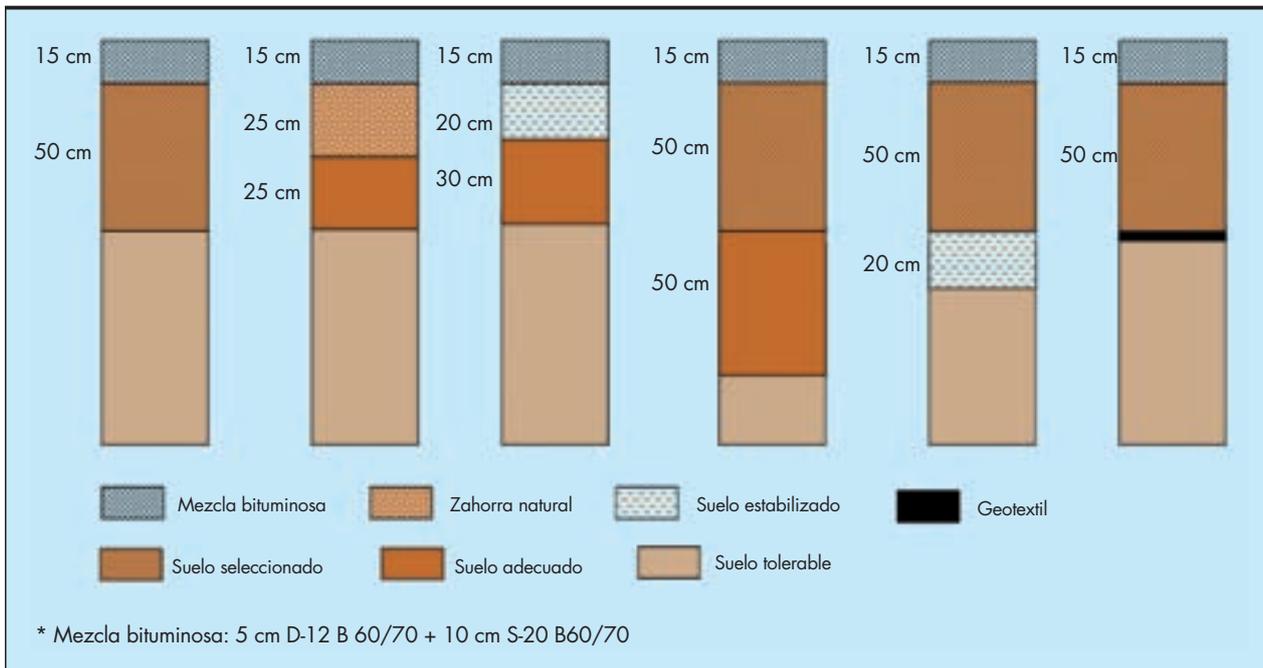


FIGURA 14. Secciones de firme del tercer ensayo de la pista (1ª Fase).

explanadas. El ensayo se realizó introduciendo agua en la explanada con el nivel freático a 100 cm bajo la coronación.

Asimismo, se incluyeron cuatro tratamientos superficiales tipo microaglomerado en caliente, que se ensayaron en las curvas de la instalación.

4.4. CUARTO ENSAYO: "ENSAYOS EN LA PISTA DE FIRMES A ESCALA REAL (2ª FASE)"

Se adoptó como explanada de referencia la misma que se tomó en la primera fase, una explanada calificada como E3

por la Instrucción 6.1 y 2-IC. Las otras cinco soluciones ensayadas fueron diseñadas por la Dirección General de Carreteras de acuerdo con los resultados obtenidos en la primera fase. El firme que se colocó fue el mismo en las seis secciones (12 cm de mezcla bituminosa) (Figura 15).

Se planteó como continuación del ensayo anterior, particularizando en el estudio de la influencia de la incorporación de suelos de diferente calidad entre la coronación y el suelo de baja calidad del terraplén, y el efecto beneficioso de la incorporación de una capa estabilizada con cemento en la corona-

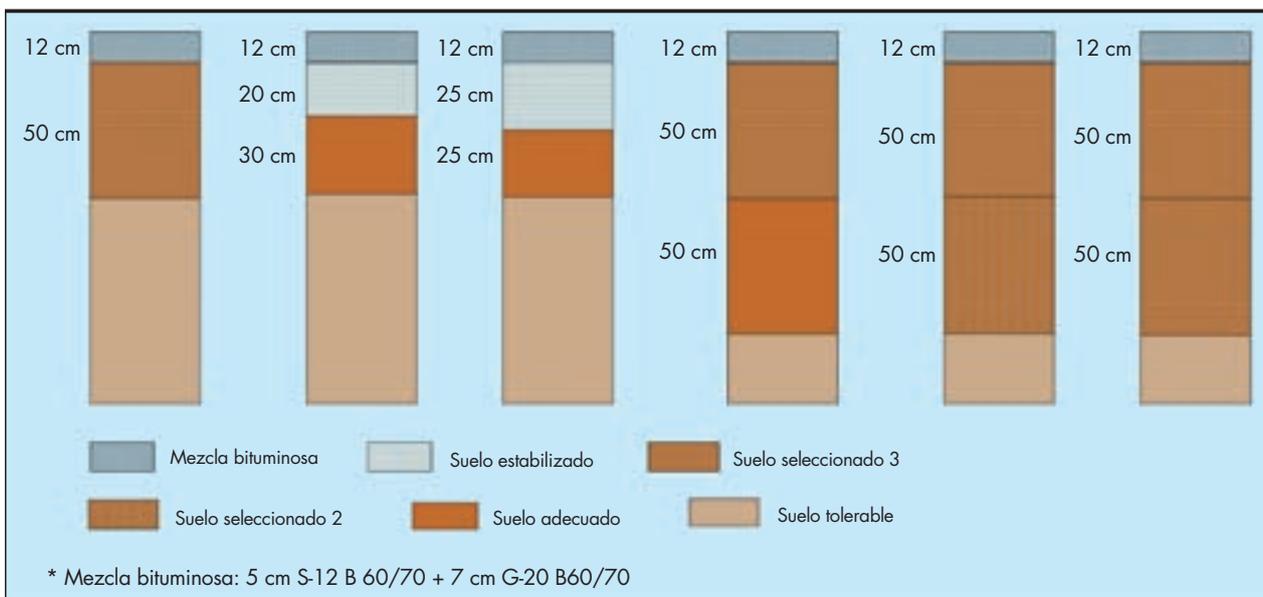


FIGURA 15. Secciones de firme del cuarto ensayo de la pista (2ª Fase).

ción y la sensibilidad de la vida de servicio respecto del espesor de dicha capa.

Nuevamente el ensayo se realizó con el nivel freático en las condiciones más desfavorables posibles admitidas en la normativa que eran 100 cm por debajo de la superficie de la explanada.

Como novedad el ensayo se hizo cubriendo con una estructura metálica las secciones rectas para reducir el impacto de las condiciones ambientales.

Se incluyeron cuatro capas de rodadura dosificadas con ligante modificado cuyo ensayo se realizó en las partes curvas de la instalación. Para ello se extendió como base una mezcla de alto módulo y como rodaduras respectivamente: mezclas discontinuas F-10 y M-10, mezcla tipo drenante PA-12, las tres mezclas fabricadas con betún modificado BM-3c, y un microaglomerado en frío tipo LB-2 fabricado con emulsión modificada ECL-2d-m.

En las dos secciones rectas se dispuso como en el ensayo anterior la misma mezcla bituminosa de tipo flexible.

Además de los deterioros considerados en la fase anterior, se incluyeron: medidas adherencia neumático-pavimento, textura, desprendimiento de áridos y permeabilidad.

La fase de aplicación de cargas se realizó desde el mes de febrero de 2002 hasta el mes de octubre del mismo año (9 meses), con la aplicación de un total de 550.000 cargas equivalentes a 13 t por eje por parte de los vehículos simuladores de tráfico. Esta operación equivale al paso de 1,1 millones de vehículos pesados, dadas las actuales características del vehículo pesado medio en España.

4.5. QUINTO ENSAYO: "ENSAYO DE EXPLANADAS EN LA PISTA DE FIRMES A ESCALA REAL DEL CEDEX"

Se dirigió de nuevo a la caracterización y el análisis del comportamiento de explanadas para validar los resultados obtenidos en el ensayo anterior. En particular se estudiaron dos grupos de alternativas: estabilización con cemento de la capa de coronación; introducción de una capa intermedia entre el núcleo de suelo tolerable y la coronación de suelo seleccionado (Figura 16).

Respecto a las condiciones de ensayo, para simular lo más fielmente posible las condiciones reales de un firme en servicio, se realizó sin cubrir, de forma que se recibiera la insolación y lluvias naturales.

En los tramos rectos se dispuso como mezcla bituminosa una capa de base tipo G-20 y encima como rodadura una mezcla discontinua tipo M-10 fabricada con betún modificado BM-3c. En las curvas se dispuso respectivamente mezcla drenante PA-12 y mezcla M-10, en ambos casos las mezclas se colocaron en dos espesores diferentes y fueron fabricadas con BM-3c.

Como criterios de fallo para decretar el fin de la vida útil de las secciones se dispuso: la fisuración de la mezcla bituminosa con un mínimo de 15% de longitud con agrietamiento generalizado o deformación permanente con un valor mínimo de 20 mm de profundidad de rodera.

Durante el ensayo se realizaron más de 20 auscultaciones para verificar el estado de las secciones a lo largo del mismo, las medidas incluyeron:

- Evaluación del estado estructural del firme: capacidad de soporte, deformación permanente, fisuración superficial (Figura 17).
- Evaluación de las características superficiales del firme: regularidad longitudinal, textura de la capa de rodadura, resistencia al deslizamiento, capacidad de drenaje.
- Medidas complementarias: precipitación, humedad de los suelos, temperatura de las mezclas bituminosas.

La fase de aplicación de cargas se realizó desde el mes de agosto de 2007 hasta el mes de mayo de 2012 (58 meses), con la aplicación de un total de 1.855.648 cargas equivalentes a 13 t por eje por parte de los vehículos simuladores de tráfico. Esta operación equivale al paso de 2,4 millones de vehículos pesados, dadas las actuales características del vehículo pesado medio en España.

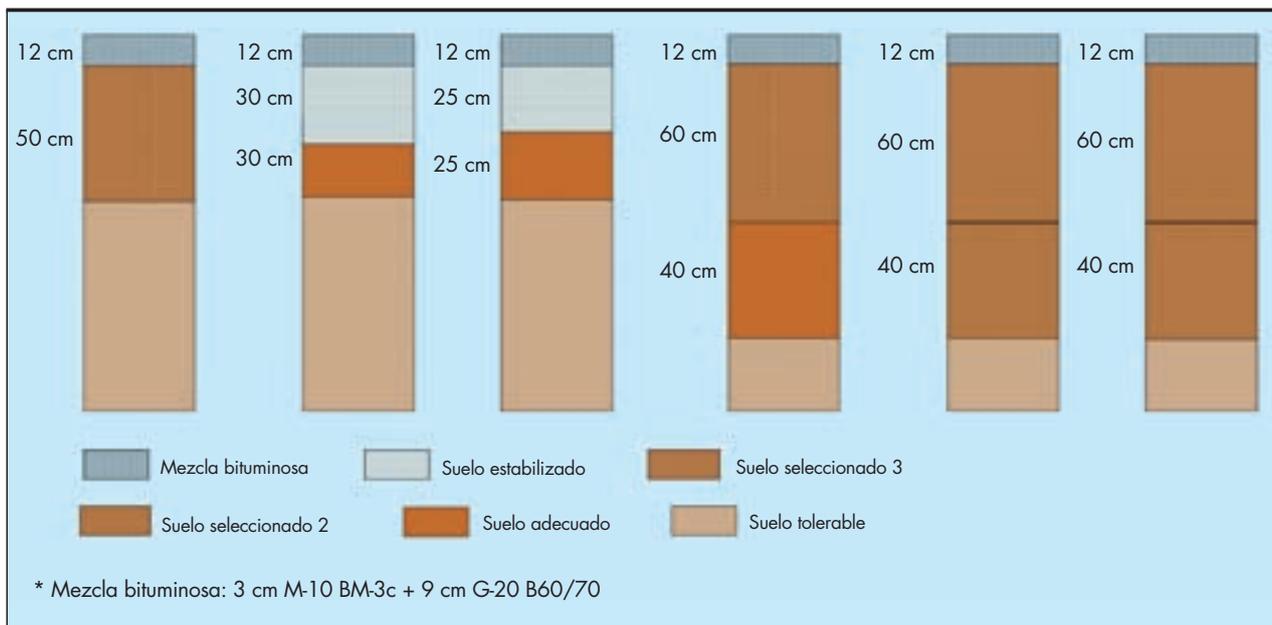


FIGURA 16. Secciones de firme del quinto ensayo de la pista.

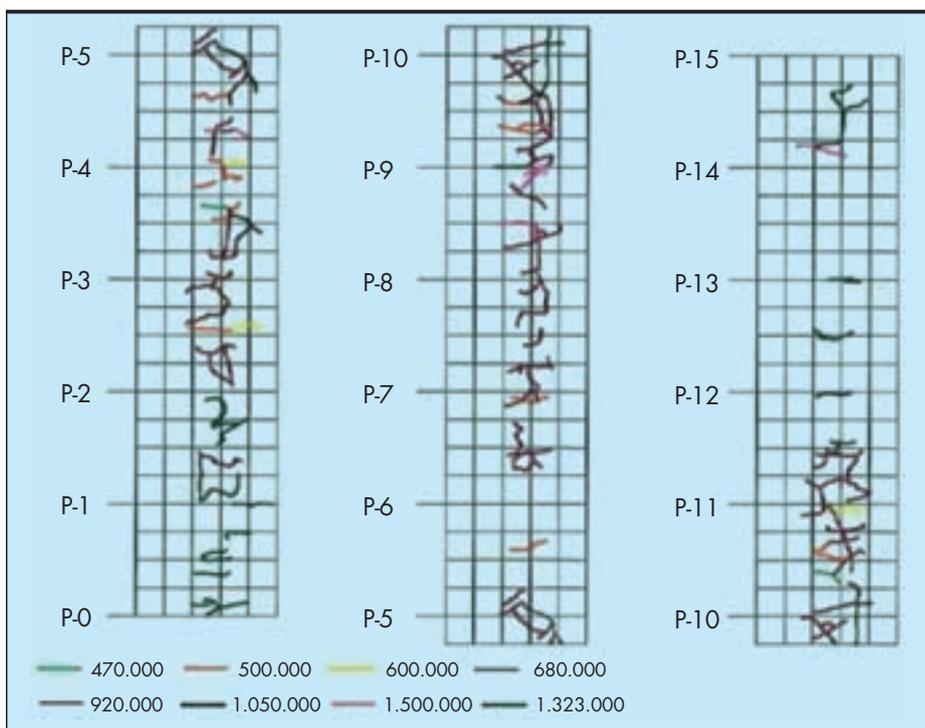


FIGURA 17. Evolución del mapa de fisuración de una sección.

5. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA

En estos 25 años de funcionamiento además de los correspondientes informes técnicos elaborados, la información obtenida a partir de la Pista de Ensayos ha contribuido en múltiples comunicaciones presentadas en congresos y artículos en diversas revistas.

Destaca la organización por parte del CEDEX en el año 2008 del Tercer Congreso Internacional del Ensayo Acelerado de Firmes (APT'08), único celebrado hasta el momento fuera de los Estados Unidos de América.

Las aportaciones más importantes ordenadas por orden cronológico han sido las siguientes:

- La pista de ensayo a escala real del Centro de Estudio de Carreteras. A. Ruiz Rubio, R. Romero Amich. Revista Ingeniería Civil nº 63/1987.
- Analysis of deflections on a test track. A. Ruiz Rubio, R. Romero Amich, J. Pérez Ayuso. Paper NDT-040 Symposium on non-destructive testing and back calculation for pavements, USA 1991.
- Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (1ª parte). R. Romero Amich, A. Ruiz Rubio. Revista Ingeniería Civil nº 79/1991.
- Primeros estudios con modelos en la pista de ensayo del CEC, desarrollo de un programa de cálculo inverso y aplicación a los resultados de la instrumentación. A. Aparicio Mourelo. Revista Ingeniería Civil nº 76/1991.
- First Test on the CEDEX test track. R. Romero Amich, A. Ruiz Rubio, J. Pérez Ayuso, Transportation Research Record nº 1354/1992.
- Use of GPR to obtain layer thickness variation in a test track. E. Lorenzo, I. Fernández, V. Cuellar. European association exploration geophysicists, Francia 1992.
- Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (2ª parte). R. Romero Amich, A. Ruiz Rubio. Revista Ingeniería Civil nº 83/1992.
- Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (3ª parte). R. Romero Amich, A. Ruiz Rubio. Revista Ingeniería Civil nº 85/1992.
- La pista de ensayo de firmes del CEDEX. Experiencias realizadas. A. Ruiz Rubio, R. Romero Amich, J. Pérez Ayuso. Congreso Mundial Federación Internacional de Carreteras (IRF), España 1993.
- Comportamiento de las marcas viales en ensayos acelerados en la pista de El Goloso. M. Blanco, A. Cuevas, R. Rodil. Congreso Mundial IRF, España 1993.
- Caracterización dinámica de las capas de la pista de ensayos del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX mediante el análisis espectral de ondas superficiales. V. Cuellar, J. Valerio, F. Muñoz. Congreso Mundial IRF, España 1993.
- Resultados del primer ensayo efectuado en la pista del Centro de Estudios de Carreteras (4ª parte). R. Romero Amich, A. Ruiz Rubio. Revista Ingeniería Civil nº 88/1993.
- Tratamiento digital de la señal en la pista de ensayos de firmes del Centro de Estudios de Carreteras. O. González Romero. Revista Ingeniería Civil nº 90/1993.
- Medidas con sensores de la pista de ensayos del CEDEX. R. Romero Amich, A. Ruiz Rubio, J. Pérez Ayuso. Congreso Mundial de Carreteras, Canadá 1997.
- Installation and análisis of sensors used in the full scale test track of the road studies centre (CEDEX). B. Mingo, J. Pérez Ayuso, J. Aleixandre, J. Bueno, J. Tamarit. International symposium on automation and robotics in construction, España 1999.

- Data acquisition real-time system for the testing track facility of the Road Studies Centre (CEDEX). J. Tamarit, J. Bueno, J. Aleixandre, B. Mingo, J. Pérez Ayuso. International symposium on automation and robotics in construction, España 1999.
- Sistema de adquisición de datos en tiempo real de la pista de ensayos acelerados de firmes del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX. B. Mingo, J. Pérez Ayuso, J. Aleixandre, J. Bueno, J. Tamarit. Revista Ingeniería Civil n° 114/1999.
- Plan de instrumentación del 3º ensayo en la pista de ensayos a escala real del Centro de Estudios de Carreteras del CEDEX. J. Tamarit, J. Bueno, J. Aleixandre, B. Mingo, J. Pérez Ayuso. Revista Ingeniería Civil n° 115/1999.
- Instrumentation at CEDEX test track. A. Mateos, J. Pérez Ayuso, R. Romero Amich, R. Rodil. International conference on the bearing capacity of roads, railways and airfields, Portugal 2002.
- Influence of moisture changes in subgrade performance. J. M. Baena Rangel, J. Pérez Ayuso, R. Rodil y R. Romero Amich. Jornada Técnica Internacional sobre el agua en explanada y capas de firmes, España 2005.
- Flexible pavements dynamic response under a moving wheel. A. Mateos, P. de la Fuente, J. Pérez Ayuso. International conference of accelerated pavement testing, España 2008.
- Managing data from instrumentation in the CEDEX test track. J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui, A. Mateos. International conference on accelerated pavement testing. España 2008.
- Managing data from instrumentation in accelerated pavement testing. J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui, A. Mateos. International symposium on non-destructive testing for design evaluation and construction inspection. Eslovenia 2008.
- Managing data from instrumentation in the CEDEX test track. J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui, A. Mateos. International symposium on automation and robotics in construction (ISARC), USA 2009.
- El ensayo acelerado de firmes como herramienta básica de investigación en carreteras. A. Mateos, J. Pérez Ayuso. Revista Carreteras n° 164/2009.
- Shift factors for asphalt fatigue. A. Mateos, J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui. Journal of the Transportation Research Board n° 2225/2011.
- Aplicación del método recursivo-incremental CALME a la evaluación del estado estructural de los pavimentos bituminosos. A. Mateos, J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui, J. O. Marrón Fernández. Revista Ingeniería Civil n° 164/2011.
- Evolution of asphalt mixture stiffness under the combined effects of damage, aging, and densification under traffic. A. Mateos, J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui. Journal of the Transportation Research Board n° 2304/2012.
- Lessons learnt from the application of Calme asphalt fatigue model to experimental data from CEDEX test track. A. Mateos, J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui, J. O. Marrón Fernández. International conference of accelerated pavement testing, USA 2012.

- Structural response of cracked pavements. A. Mateos, J. Pérez Ayuso, B. Cadavid Jáuregui. Annual meeting of the Transportation Research Board, USA 2013.

6. FUTURO DE LA PISTA DE ENSAYO ACELERADO DE FIRMES

Los firmes de carretera no se diseñan para soportar la aplicación de una carga de una determinada magnitud, sino para un número limitado y tasado de repeticiones de cargas. Ocurre que cuando se introduce un nuevo producto, en la mayor parte de las ocasiones, la demostración de sus bondades se limita a unos determinados ensayos de laboratorio. A lo sumo se hacen unos tramos de control que se siguen durante uno, dos, pero raramente más de tres años. Los ensayos de laboratorio son una buena aproximación a la realidad y, por supuesto, los tramos de ensayo son útiles, pero no del todo a los tres años, cuando se espera que su vida útil sea de 10 o 20 años. Es decir, hay un vacío entre esas pruebas y la realidad bastante considerable.

Instalaciones como las Pistas de Ensayo Acelerado deberían ser herramientas imprescindibles en la aceptación de nuevos materiales y de métodos constructivos. La comparación de distintas soluciones en cortos periodos de tiempo de ensayo, sería utilísima para la demostración de las mejoras que los nuevos materiales, soluciones o métodos constructivos proporcionarían frente a los existentes. Se trata, en definitiva, de la posibilidad de disminuir considerablemente esa distancia entre la teoría y la realidad, y además de forma rápida, económica, rigurosa y fiable.

Son muchas otras las aplicaciones que puede darse a este tipo de instalaciones, entre ellas la valoración de las afecciones al entorno cuando se emplean ciertos materiales, por medio de la medición de la contaminación del terreno natural o los acuíferos. Se puede determinar también, la influencia de aditivos, materiales secundarios o los diversos métodos de rehabilitación.

Todas las actividades deberían ir acompañadas de una adecuada política de comunicación e implementación de los resultados obtenidos en la tecnología de firmes de carreteras.

Como resumen, habría que señalar que la Pista de Ensayo Acelerado de Firmes se encuentra en una relativa juventud en lo referente al uso que ha tenido, si se le compara con las enormes posibilidades que deberían aprovecharse en el futuro. Sería deseable un larguísimo recorrido si todos los involucrados en la planificación, proyecto, construcción, conservación, y gestión optan por una metodología rigurosa, económica y fiable que esté al servicio de la auténtica innovación de productos que aporten un valor añadido a los usuarios, a los administradores de carreteras, a la industria y en general a toda la sociedad.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren manifestar su agradecimiento a todos los técnicos que durante estos 25 años han desarrollado parte de su vida laboral en los trabajos realizados en la Pista de Ensayos Acelerados de Firmes del CEDEX y que gracias a cuya labor se encuentra en la primera línea de este tipo de instalaciones a nivel mundial. No solamente los que han prestado su servicio de forma directa en la Pista, sino también el personal del resto de las Áreas que componen el Centro de Estudios del Transporte, así como los pertenecientes a otros centros del Organismo que han participado en los trabajos que se han desarrollado en la Instalación, como son el Laboratorio de Geotecnia, el Laboratorio Central de Estructuras y Materiales y el Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas.

Penetraciones estáticas en materiales glaciares polacos. Propuesta de correlaciones a utilizar

JUAN-ALFONSO CARCOLÉ GALEA (*) y ANA MARÍA AGUILAR BAUZA (**)

RESUMEN En este documento se analiza el uso de ensayos de penetración estática tipo CPTU en la caracterización de terrenos sobreconsolidados no-permeables realizados para el asesoramiento geotécnico al consorcio DRAGADOS, S.A. y POLAQUA, S.A. adjudicatario de la obra "CONSTRUCCIÓN DE LA AUTOVÍA S8 EN EL TRAMO NUDO WALICHNOWY NUDO WROCLAW (A1), TRAMO 5 (NUDO SIERADZ POLUDNIE SIN NUDO – NUDO LASK SIN NUDO) DEL PK 140+552,05 AL PK 174+200,00".(POLONIA). El presupuesto de la obra asciende a 1.388.898.322,99 PLN (unos 347 millones €), destinados a la construcción de 34 Km de autovía.

STATIC PENETRATION IN POLSKA GLACIAR GROUNDS. CORRELATIONS PORPOSED TO USE

ABSTRACT *In this document, we discuss the use of static penetration tests, CPTU type, in the characterization of non-permeable overconsolidated soils. This CPTU was made for geotechnical support for the consortium Dragados, SA and POLAQUA, S.A. awarded the construction "S8 HIGHWAY CONSTRUCTION IN STRETCH KNOT KNOT Walichnowy WROCLAW (A1), SECTION 5 (KNOT SIERADZ KNOTLESS poludnie - KNOTLESS Lask KNOT) OF THE PK PK 174 140 +552,05 +200,00" (POLAND). The cost of the project is 1,388,898,322.99 PLN. (approximately 347 million €), for the construction of 34 Km of motorway.*

Palabras clave: "Glina", CPTU, Presión de preconsolidación aparente, O.C.R, Módulo edométrico, Resistencia al corte no drenada, Índices de fluidez, Nspt.

Keywords: "Glina", Apparent yield stress, O.C.R., Constrained modulus, Undrained shear strength, Fluidity index, Nspt.

1. INTRODUCCIÓN

Es práctica habitual en Polonia realizar los cálculos geotécnicos en la ingeniería civil, apoyados, a menudo de manera exclusiva, en ensayos tipo CPTU.

Dichos ensayos son ampliamente conocidos y utilizados en todo el mundo en materiales sobre todo, pero no exclusivamente, Normalmente Consolidados y especialmente en terrenos de resistencias al cono usualmente inferiores a 3 o 4 Mpa.

En la actualidad se están desarrollando en Polonia obras de gran envergadura que llevan a replantearse qué correlaciones serán las que se adapten mejor a los terrenos del país.

El presente artículo se centrará en el análisis de las "glinas" (arenas arcillosas, limos y arcillas glaciares) de diferentes edades que se suelen ver afectadas por estas nuevas obras.

Todos los datos utilizados en el presente estudio pertenecen a la construcción de la autovía S-8, adjudicada al consorcio DRAGADOS, S.A.-POLAQUA, S.A. Se trata de un tramo de 34 km de autovía con dos carriles por sentido y una mediana de 11 m., sobre un firme rígido de hormigón y con 33 estructuras, donde destacan los viaductos sobre los ríos Warta y Grabia, de 947 y 838 m. respectivamente. La obra implica un movimiento de tierras de 5.5 millones de m³ de terraplén, alcanzando altura máxima de 14,2 m. En cuanto a estructuras, se requieren más de 150.000 m³ de hormigón estructural, así como 65.000 ml de pilotes de hasta 1.800 mm de diámetro. El firme rígido se compone de una capa de 20 cm de hormigón magro, sobre la que se extienden los 659.000 m² de pavimento de hormigón con 29 cm de espesor, divididos en dos capas de 24 y 5 cm. La superestructura se caracteriza por los más de 190.000 m² de pantallas acústicas, cimentadas sobre 39.000 ml de pilotes de diámetro 800 mm. Por último el terreno tiene tratamientos de mejora realizados con jet grouting y con más de 200.000 m.l. de columnas de grava-cemento.

(*) Ingeniero geólogo. por la Universidad de Barcelona y Universidad Politécnica de Cataluña. Empresa de geotecnia IGPS SL. Asesor geotécnico S-8 POLAQUA-DRAGADOS Polonia. E-mail: igps@igps.cat

(**) Geóloga por la Universidad de Barcelona. Master en Ingeniería Geológica por la Universidad Complutense de Madrid. Empresa de geotecnia IGPS. S.L. Asesor geotécnico S-8 POLAQUA-DRAGADOS. Polonia. E-mail: aina.igps@igps.cat

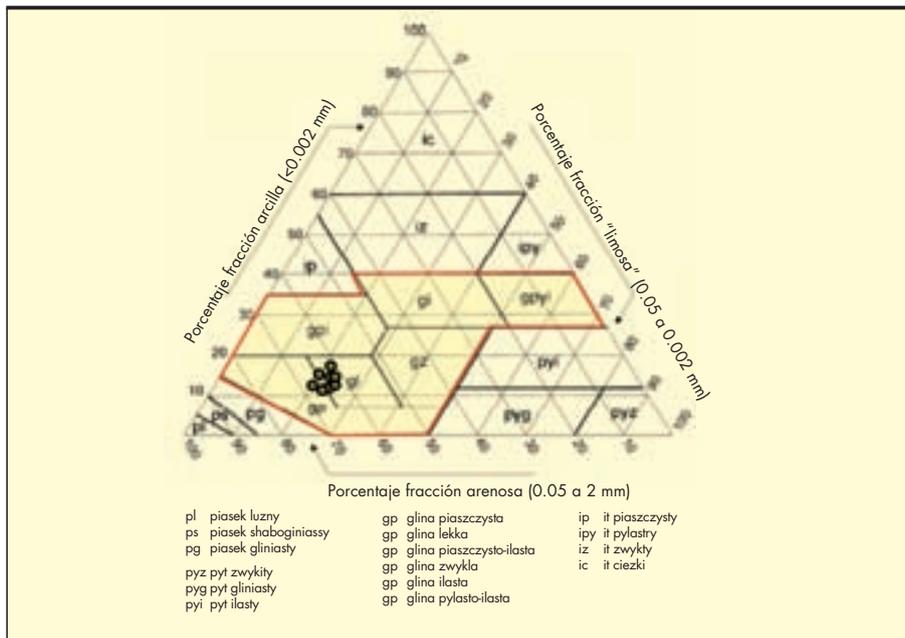


FIGURA 1. Diagrama de las clasificaciones de suelos polacos PTG 2008.

En esta obra se ha realizado más de 2.000 m.l. de ensayos de penetración estática de cono eléctrico tipo CPTU. Junto a 56 de estas prospecciones, se han realizado sondeos de rotación con recuperación continua de testigo de 30 m. de longitud cada uno. Los sondeos se han entubado siempre y se han tomado muestras inalteradas. Parte de estas muestras se han tomado con tubo tomamuestras convencional de pared gruesa y parte de ellas con shelby de pared delgada introducida a presión.

2. NATURALEZA DEL MATERIAL CARACTERIZADO

Se entiende por “**glinas**” en Polonia, los materiales provenientes del deshielo de los glaciares. En general materiales de media a baja permeabilidad, entre **SM, SC, ML-CL y CL** según varía la cola de finos y el índice plástico. La Figura 1 muestra la carta de clasificación de suelos polaca con los materiales analizados.

La Figura 2 muestra las granulometrías y los límites de Atterberg realizados; un grupo, con la fracción granulométrica que pasa por el tamiz 0,4 mm acorde a las Normativas anglosajonas (U.S. standard) y otro grupo realizado con la que pasa por 2 mm, acorde a la Normativa polaca.

La Figura 3 muestra el aspecto de las “glinas” que ya sean en realidad arenas o no, se identifican claramente como un material no drenado por la cantidad de finos que tienen.

Además de muestras con toma muestra convencional de pared gruesa se tomaron también con shelby de pared delgada, de 70 mm inyectada en toma muestras de pistón.

Más allá de la más estricta geología, **Geotécnicamente**, es decir bajo el punto de vista puramente ingenieril, se pueden distinguir en el presente artículo, tres pisos de “glinas superficiales” (entre 0 y 35 m de profundidad). El primer piso son “**glinas superiores**” de resistencias de punta usualmente comprendidas entre 1 y 3,5 Mpa. Con valor casi medio y más frecuente de **qt=2,25 Mpa** formado por SC, ML,y CL.

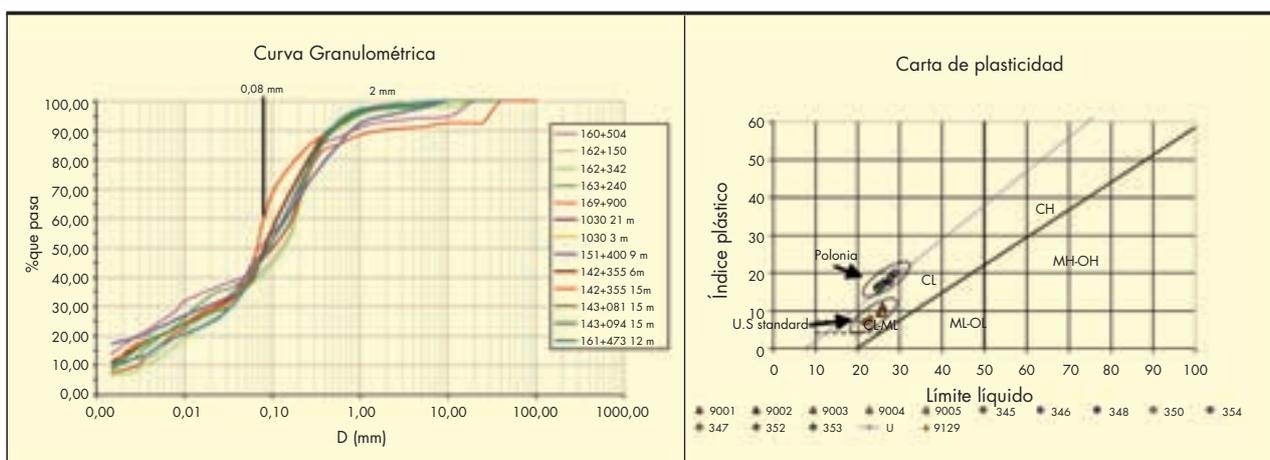


FIGURA 2. Granulometrías y carta de plasticidades de Casagrande.



FIGURA 3. Aspecto de las “glinas” en sondeos helicoidales y en los sondeos de rotación.

El segundo piso, “*glinas medias*”, se observa siempre por debajo del anterior. El valor de la punta del CPTU suele estar entre 4 y 6 Mpa, con un valor medio y usual de $qt \approx 5$ Mpa.

Y el tercer paquete, “*glinas inferiores*” tiene resistencia de punta de entre 7 y 12 Mpa, con valor usual entorno a $qt \approx 10$ Mpa. No está claro que la separación entre pisos inferiores sea geológicamente correcta pero, como se verá, tiene su explicación geotécnica.

La Tabla 1 (Página siguiente) muestra los ensayos realizados.

La Figura 4 muestra el CPTU típico realizado en “glinas”. Se observa entre 3 y 14,5 m el que se ha denominado “piso superior” ($qt \approx 2,25$ Mpa). En él se podrían realizar sub-pisos (3 a 5 m; 5 a 10 m y 10 a 14,5 m), que corresponderían a ligeros cambios en el contenido de finos. Por debajo de 14,5 m el “piso medio” ($qt \approx 5$ Mpa).

3. CARTAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PENETRÓMETROS ESTÁTICOS

La Figura 5 muestra algunos resultados de los CPTU proyectados en la carta de clasificación de Robertson 1990.

Da la sensación de ser siempre un material del grupo 4, con dispersión a grupos 5 y 3 para el “piso superior”, que es el más joven y menos consolidado. En cuanto a los pisos “medio” e “inferior”, básicamente se centra en grupo 4, llegando al 9, con el aumento de la qt (y lógicamente de Q_t), que significa evidentemente también su aumento de OCR.

Bajo un punto de vista estrictamente geotécnico el aumento de qt y f_s se atribuye directamente a un aumento de la presión de preconsolidación, ya sea “apparent yeild stress” o sobrecarga estricta que haya existido (bajo un punto de vista geológico esta diferencia sí tendría una importancia que no es objeto de este artículo).

Estos resultados están sacados de siete CPTU representativos de la obra, por lo que con la totalidad, la dispersión crece, pero el peso de las gráficas de la Figura 5 se ha observado siempre totalmente válido.

Para materiales sobreconsolidados como son en general las “glinas”, resulta muy útil la carta de Eslami-Fellini (1997). Esta se basa solamente en 5 zonas. En la Figura 6 se mantienen los puntos graficados en la Figura 5.

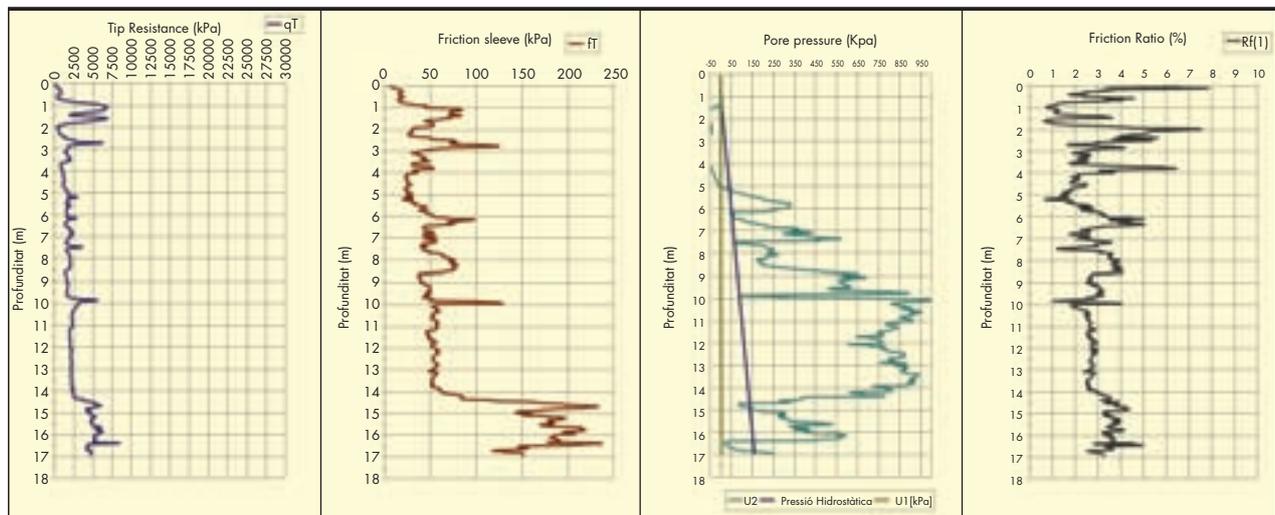


FIGURA 4. Aspecto de las “glinas” en los ensayos CPTU. Ejemplo del ensayo WS 5-1 de la obra.

PARAMETROS EDOMETRO										
piso	colores	MUESTRA	PK	PROFUNDIDAD	Cc	e0	Cs	Cc/(1+e0)	qt Mpa	qt - sv Mpa
P sup		9001	160+504	9,30	0,12	0,448	0,0223	0,083	1,75	1,564
		9002	162+150	15,30	0,06	0,304	0,0157	0,048	5	4,694
		9003	162+342	6,30	0,05	0,29	0,0111	0,042	5	4,874
		9004	163+240	9,30	0,05	0,273	0,0174	0,042	4,7	4,514
		9005	169+900	18,30	0,06	0,293	0,0195	0,049	5,4	5,034
		345	82/12/G/345	15,3	0,081	0,319	0,0163	0,061	2,75	2,444
		346	82/12/G/346	6,3	0,0894	0,339	0,0183	0,067	1,75	1,624
		348	82/12/G/348	15,3	0,0962	0,369	0,02	0,070	2	1,694
		350	82/12/G/350	15,3	0,0783	0,342	0,016	0,058	3,5	3,194
		354	82/12/G/354	9,3	0,111	0,569	0,0207	0,071	2,4	2,214
		347	82/12/G/347	12,3	0,1187	0,424	0,0154	0,083	2,3	2,054
P med/inf?		352	82/12/G/352	030 53E 314	3,3	0,0766	0,513	0,051	6,5	6,434
P inf		353	82/12/G/353	030 53E 314	21,3	0,0672	0,538	0,044	9	8,574
P sup		9129	162+420	5,25	0,088	0,383	0,0162	0,064	2,15	2,045

qt Mpa	qt - sv Mpa	(qt-sv)/ sv' Mpa	qt/SV	Lw	Lp	IP	2 mic	e0	W0	%0,08 mm	Cc	Cs	Cc/(1+e0)	USCS
1,75	1,564	14,617	16,36	25,90	14,70	11,20	16,70	0,448	16,98	49,50	0,12	0,0223	0,08	SC
5	4,694	21,833	23,26	22,93	14,93	8,00	7,90	0,304	10,70	40,70	0,06	0,0157	0,05	SC
5	4,874	39,626	40,65	21,90	14,60	7,30	6,70	0,29	10,90	39,30	0,05	0,0111	0,04	SC
4,7	4,514	35,997	37,48	25,20	15,70	9,50	10,30	0,273	10,00	45,30	0,05	0,0174	0,04	SC
5	5,034	21,792	23,38	25,93	16,33	9,60	8,30	0,293	10,50	44,50	0,06	0,0195	0,05	SC
2,75	2,444	14,635	16,47	26,00	8,60	17,40	12,10	0,319	11,40	55,37	0,081	0,0163	0,06	CL
1,75	1,624	21,091	22,73	25,80	8,80	17,00	14,30	0,339	11,90	47,58	0,0894	0,0183	0,07	SC
2	1,694	10,205	12,05	27,30	9,60	17,70	14,30	0,369	14,00	48,63	0,0962	0,02	0,07	SC
3,5	3,194	19,241	21,08	24,80	8,50	16,30	12,00	0,342	11,50	46,21	0,0783	0,016	0,06	SC
2,4	2,214	18,298	19,83	28,80	8,70	20,10	18,00	0,569	12,80	47,79	0,111	0,0207	0,07	SC
2,3	2,054	14,906	16,69	25,00	8,70	16,30	15,30	0,424	14,20	47,63	0,1187	0,0154	0,08	SC
6,5	6,434	149,628	151,16	27,70	8,90	18,80	12,00	0,513	10,50	32,89	0,0766	0,011	0,05	SC
9	8,574	38,448	40,36	24,70	9,10	15,60	11,20	0,538	10,60	46,21	0,0672	0,01	0,04	SC
2,15	2,05	36,85	38,74	22,80	14,90	7,80	14,60	0,38	13,80	49,30	0,09	0,02	0,06	SC

qt Mpa	qt - sv Mpa	(qt-sv)/ sv' Mpa	qt/SV	Lw	Lp	IP	2 micras	e0	W0	%0,08 mm	Cc	Cs	Cc/(1+e0)	USCS
2,33	2,10	18,73	20,49	25,80	10,31	15,48	14,66	0,40	13,32	49,00	0,10	0,02	0,07	SC-CL
4,93	4,78	29,81	31,19	23,99	15,39	8,60	8,30	0,29	10,53	42,45	0,06	0,02	0,05	SC
7,75	7,50	94,04	95,76	26,20	9,00	17,20	11,60	0,53	10,55	39,55	0,07	0,01	0,05	SC

TABLA 1. Tabla de los ensayos CPTU y edómetros analizados.

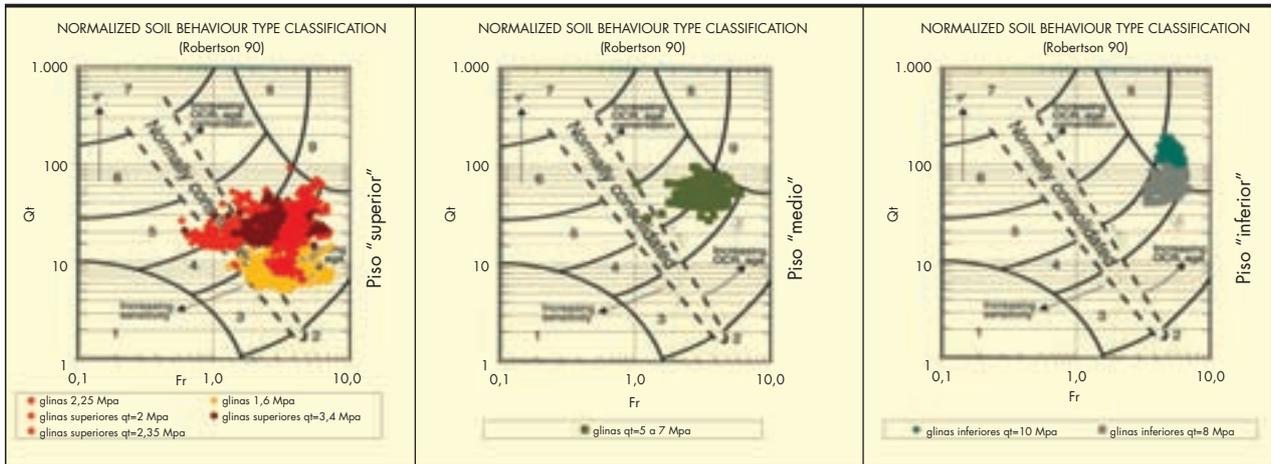


FIGURA 5. Clasificación de Robertson 1990, para los tres pisos geotécnicos definidos.

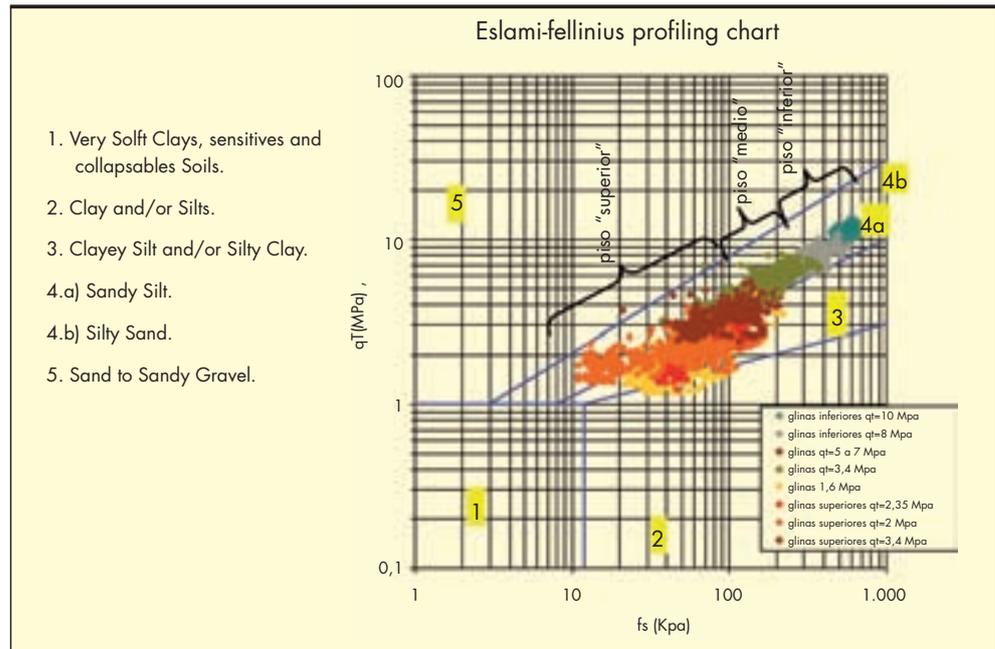


FIGURA 6. Clasificación de Esmali-Fellinius 1997, para los tres pisos geotécnicos definidos.

4. CORRELACIÓN CON LOS PARÁMETROS OBTENIDOS EN LOS EDÓMETROS

4.1. DATOS GENERALES

Los ensayos analizados pertenecen todos a “glinas” en mayor o menor medida sobreconsolidadas. Por lo que establecer las P'_0 en dichos ensayos es de por sí complejo. Además la toma de muestras no permite, a veces, especímenes de buena calidad. Por lo que los resultados pueden tener cierta dispersión propia de la interpretación y no de la realidad. En el presente trabajo se ha hecho la reconstrucción de Schmertman (1953) para establecer la determinación de las P'_0 en materiales sobreconsolidados.

4.2. VALORACIÓN DE LA PRESIÓN APARENTE MÁXIMA (P'_0) Y DEL O.C.R.

Para establecer una correlación útil para determinar la presión de sobreconsolidación P'_0 , se analiza primeramente la

proyección de los resultados en la gráfica (P'_0 vs $(qt-\sigma_{v0})$). Hay que apuntar que en la bibliografía habitual los valores de $qt-\sigma_{v0}$ suelen ser inferiores a 1.000 Kpa, que es justo donde empiezan las “glinas” analizadas. Las relaciones halladas en la literatura general son del tipo (en realidad para arcillas que normalmente se identifican como materiales tipo CL).

$$P'_0 = \alpha * (qt - \sigma_{v0}) \quad \text{con } \alpha \approx 0,2 \text{ a } 0,4$$

Para encontrar gráficas más amplias hace falta analizar trabajos como los de Kulhawy and Mayne (1990) y observar graficados valores normalizados ($(qt-\sigma_{v0})/Pa$) de hasta 100, donde sí se encontrarán resistencias de punta similares. Las “glinas” se ubican en valores aproximados entre 1.000 y 10.000 Kpa. En las “glinas” el término σ_{v0} pierde peso ya que se analizan profundidades poco importantes (0 a 20 m) y los valores de qt de partida son muy elevados comparados con los

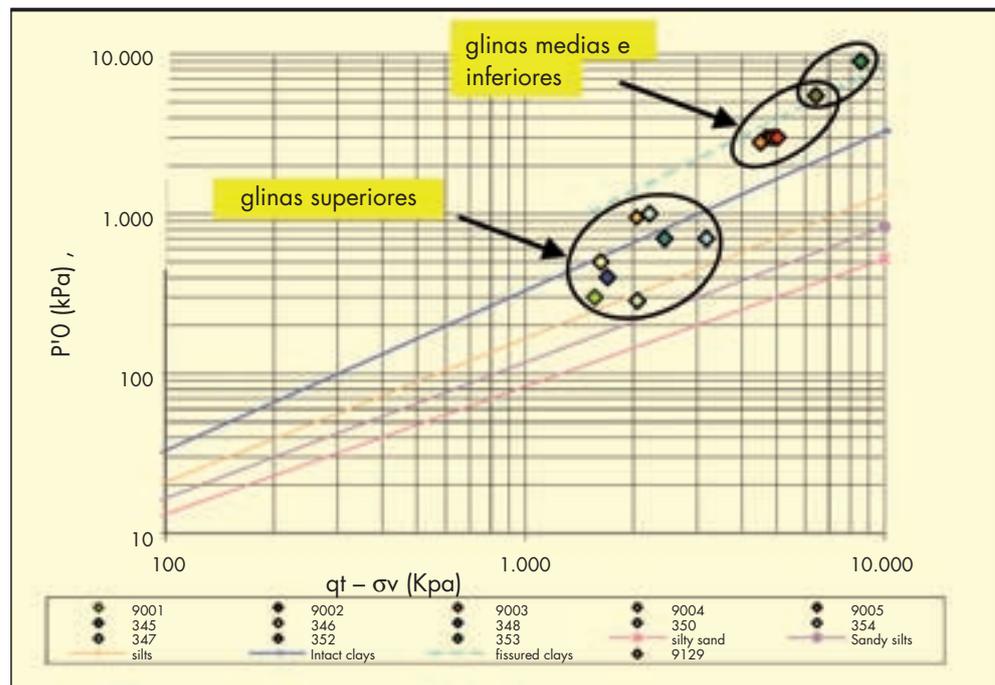


FIGURA 7. Resultado de ensayos en las "glinas" polacas y correlaciones propuestas por Mayne según las diferentes naturalezas de los materiales. Fuente: 17th ICSMGE 2009 Alexandria.

habituales de lodos marinos o de otros terrenos jóvenes NC. Con el tiempo la correlación de P'_0 fue generalizada, por ejemplo Mayne (2009), y se reescribe, fijando $\alpha=0,33$ y entendiendo que se requiere de un exponente que esté ligado a la naturaleza del material ensayado. Esta es una idea que, como se verá, se utilizará en el resto de correlaciones del presente artículo.

$$P'_0 = 0,33 * (qt - \sigma_{v0})^m$$

Es evidente que, con todo y que el contenido de finos se puede considerar una ventana relativamente bien definida en las "glinas" de la obra, aproximadamente entre el 40 y el 60%, una expresión de este tipo permitirá ajustar mejor las "glinas" (predominantemente limo-arenosas o areno-limosas) a las presiones de preconsolidación a considerar.

La Figura 7 muestra los puntos ensayados en el presente trabajo y las diferentes correlaciones (líneas de colores) que propone Mayne (2009) (17th ICSMGE 2009 Alexandria), más la de arcillas fisuradas que también propone en la misma carta.

En esta gráfica resulta lógico que las "glinas" al no ser materiales clasificables como puramente arcilla "CL" se desplazan a valores más propios de limos y limos arenosos.

Parecería que nuestras "glinas" jóvenes ("superiores") se mueven entre $m=0,85$ y $m=1,1$ típico de materiales como los nuestros (la dispersión de estos valores entra en total concordancia con la identificación de las Figuras 5 y 6, pero también con el método de determinación de P'_0 en los edómetros); y que las "glinas" más antiguas ("medias e inferiores") se ajustan a los valores de arcillas fisuradas, más cuanto mayor es la qt . Para este segundo hecho existen explicaciones que se discutirán en el presente artículo que van más allá de una verdadera prefisuración del material.

La Figura 8 muestra la correlación que se haría si no se estuviera influenciado por los trabajos de Mayne y otros. En la figura de la derecha se ha añadido también la expresión generalizada con $m=0,95$ que parece el valor medio en la Figura 9.

Es importante observar que, frente a las correlaciones conocidas, las "glinas jóvenes", con nuestra correlación, son coincidentes a la práctica con $P'_0 (Kpa) = 0,33 * (qt - \sigma_{v0})^{0,9}$ a $0,95$. Pero las antiguas son muy diferentes ya que se van a la zona de "fissured clays" de Mayne. En conclusión se puede establecer:

$$P'_0 (Kpa) = 0,33 * (qt - \sigma_{v0})^{0,95} \text{ válida para el rango } qt - \sigma_{v0} = 0 \text{ a } 3,5 \text{ Mpa}$$

$$P'_0 (Mpa) = 0,13 * (qt - \sigma_{v0})^2 \text{ válida para el rango } qt - \sigma_{v0} = 1,5 \text{ a } 10 \text{ Mpa}$$

No obstante cabe preguntarse el por qué de la pérdida de linealidad que se da al dejar las "glinas jóvenes" y pasar a otras más sobreconsolidadas (se trata de un primer piso de $P'_0 \approx 0,25$ a 1 Mpa frente a $P'_0 \approx 3$ Mpa y $P'_0 \approx 9$ Mpa). Este hecho es muy habitual en las gráficas típicas de Tavenas, Mayne, etc y se atribuye siempre a que las arcillas están fisuradas. En el presente trabajo se observaron las muestras con lupa y no se intuyeron fisuras en el material (si bien es cierto que la perforación y la toma de testigos pueden alterar las muestras). Si a este hecho se añade que las presiones intersticiales (u_2) en lugar de aumentar, usualmente disminuyen en estos materiales de qt mayor, hasta llegar a ser negativas en muchas ocasiones, sí se cree que puede atribuirse a fisuras, pero también éstas podrían producirse por la velocidad de avance demasiado rápida del CPTU frente a estos materiales tan rígidos. Se entiende que el fenómeno podría ser como el de propagación de fisura en una roca (o como un fenómeno de dilatancia), pero con la punta del CPTU abriendo las paredes y desplazándose por la fisura generada, produciéndose un fenómeno de succión intersticial en la punta del mismo y dándose una disminución de la qt que correspondería de manera lógica a dichos terrenos. Evidentemente estos fenómenos no ocurrirían en los ensayos edométricos, y por lo tanto los valores pierden la linealidad. La pregunta es si realmente guardan algún tipo de proporcionalidad como se ha inten-

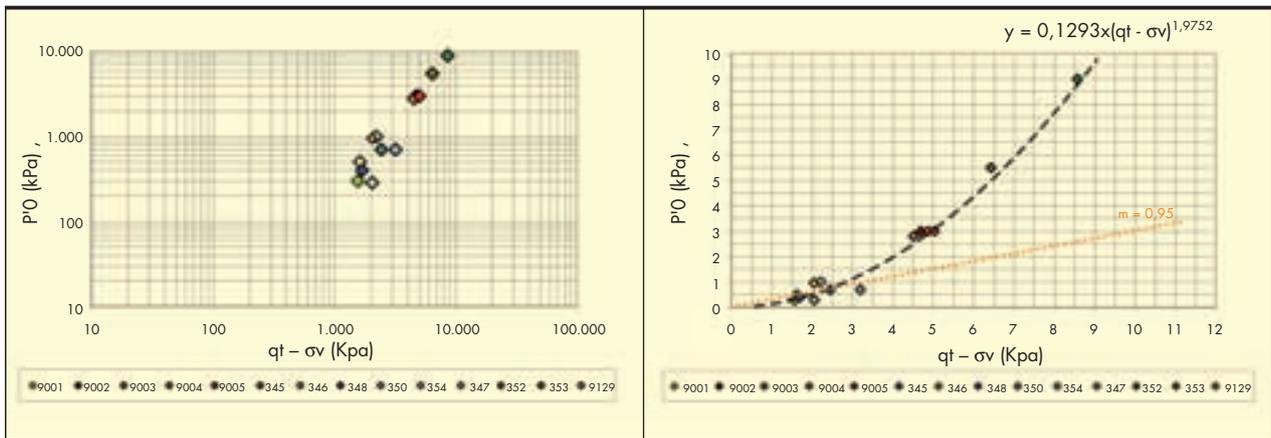


FIGURA 8. Resultado de ensayos en las glinas polacas y correlaciones propuestas C-A para la P'o.

tado hallar en la Figura 10 y en la correlación exponencial propuesta. Se observa en la Figura 9 de Mayne (2009), pero también se observa en otras de otros autores, como a partir de $qt - \sigma_{v0} \approx 3$ Mpa no existe población de puntos que justifique la linealidad de las correlaciones usualmente utilizadas. Y por lo tanto **cabe preguntarse si las correlaciones habituales del tipo $P'o = 0,33 * (qt - \sigma_{v0})$ pueden ser no válidas por un tema de limitación del propio ensayo a partir de $qt > 3$ Mpa.**

Respecto al OCR es suficiente con considerar P'_0 / σ'_{v0} , luego se puede determinar:

$$OCR = 0,13 * (qt - \sigma_{v0})^2 / \sigma'_{v0}$$

También es habitual en la bibliografía establecer la correlación entre el OCR y Q_t . En este caso se obtiene la Figura 9.

Se podría establecer también la correlación:

$$OCR = 0,065 Q_t^{1,67}$$

4.3. MÓDULO EDMÉTRICO

Existen multitud de publicaciones respecto al módulo edométrico que se puede correlacionar desde el parámetro de la resistencia de punta del cono, del tipo:

$$M = \alpha \times q_n$$

Con usualmente $\alpha \approx 5$ a 10 en materiales sobreconsolidados. Para materiales NC Senneset 89 propone valores entre 4 y 8. Pero son muy conocidos los trabajos previos de Michel and Gardner 75 donde se establece $M = \alpha_m \times q_c$, con valores entre 1 y 3 para $q_c < 2$ Mpa y de hasta 6 para valores $q_c > 2$ Mpa. (silts of low plasticity).

En materiales OC, cabe destacar los trabajos de Kulhawy and Mayne 1990 donde proponen la expresión cuyo uso se ha extendido de manera notable $M = 8,25 * (qt - \sigma_{v0})$. Aunque en el presente artículo se prestará especial atención a los gráficos de TS Tan, KK Phoon, DW Hight and S Leroueil (2006) mostrados en "Characterisation and engineering properties of natural Soils Vol 3".

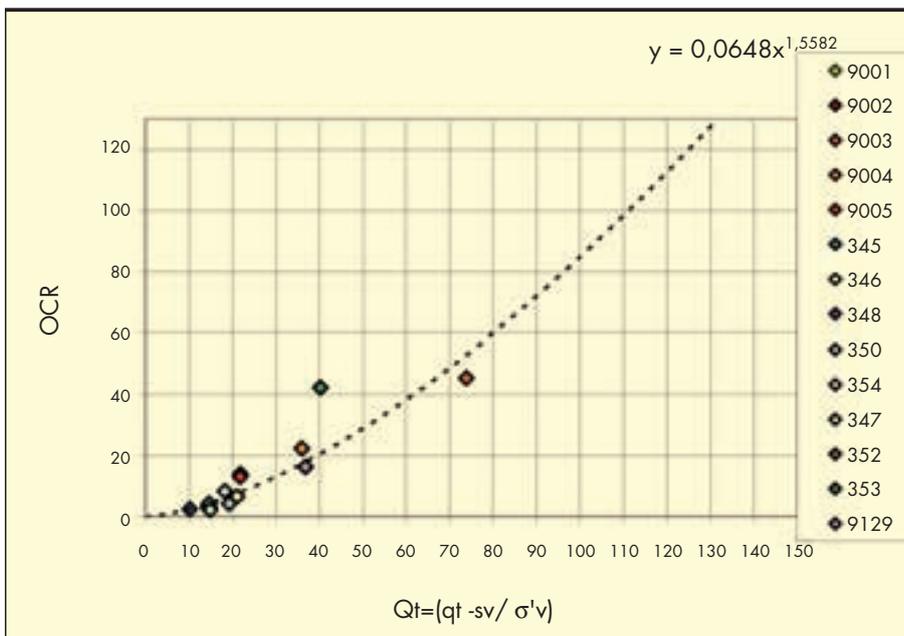


FIGURA 9. Resultado de ensayos en las "glinas" polacas y correlación propuesta para el OCR.

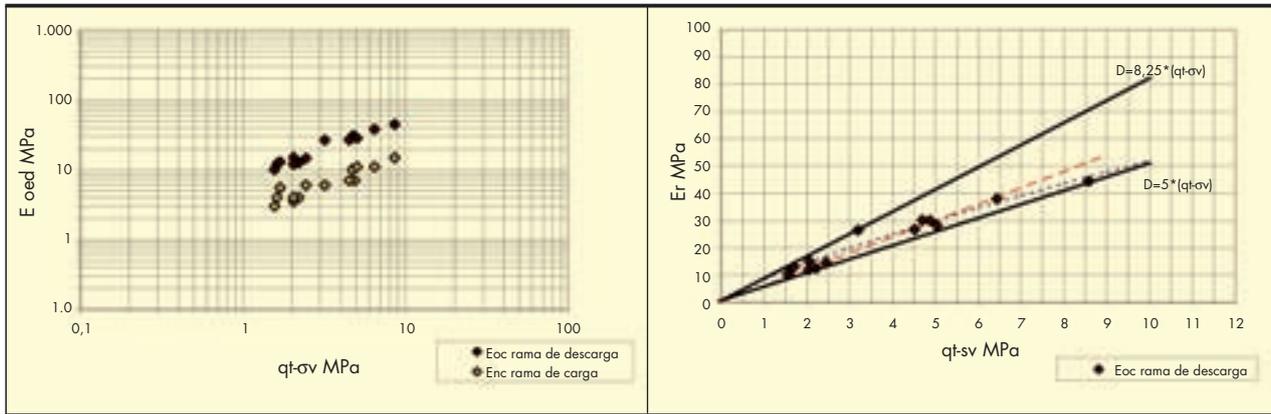


FIGURA 10. Resultado de ensayos en las “glinas” polacas y correlaciones propuestas para el Módulo edométrico O.C.

La Figura 10 muestra la graficación de los módulos obtenidos NC y OC. En la figura derecha se muestran los límites típicos de 8,25 y 5 (Mayne 2006). Parece evidente que los valores obtenidos se encuentran entremedio de los valores descritos. Si bien es cierto que las glinas de $qt-\sigma_v < 2$ Mpa podrían coincidir con 8,25, las de $qt-\sigma_v > 2$ Mpa parecen desviarse mucho de ese valor y se acercan más a 5.

Debido al comportamiento no claramente lineal de los materiales a qt altas, se propone un tratamiento exponencial de esta correlación:

$$D_{OC} = 8,25 * (qt - \sigma_v)^{n=0,8}$$

Donde se considera para las “glinas” polacas un valor de $n=0,8$

Respecto a los valores Normalmente Consolidados se puede definir la Figura 11. Los valores son relativamente bajos, pero están dentro del rango habitual.

Se propone adoptar:

$$D_{NC} = 2,5 * (qt - \sigma_v)^{0,8}$$

$$D_{NC} = 1,83 * (qt - \sigma_v)$$

o en relación directa a qt:

$$D_{NC} = 2,2 * (qt)^{0,86}$$

$$D_{NC} = 1,74 * (qt)$$

En este caso el comportamiento es marcadamente más lineal, por lo que cualquiera de las dos expresiones parecen correctas para todo el rango de $qt-\sigma_v$ evaluado.

5. CORRELACIÓN OBTENIDA CON LOS ENSAYOS DE RESISTENCIA

5.1. ÁNGULO DE ROZAMIENTO Y COHESIÓN

Se han realizado una serie de ensayos de corte directo consolidados y drenados, así como ensayos triaxiales Consolidados No Drenados (CU, con medida de presiones intersticiales) y consolidado drenado (CD). La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en los ensayos realizados.

La Figura 12 muestra los resultados de los ensayos respecto al ángulo de rozamiento del terreno. En la figura izquierda se observa como No existe variación del ángulo de rozamiento con la variación del índice de poros. Sí se identifican claramente diferentes el “piso inferior” y el “medio”, este segundo al ser más arenoso y con qt mayor y con índice de poros inferior, obtiene, ángulos de rozamiento claramente más elevados.

La correlación de cohesión del terreno es siempre más discutible y desde un ensayo de CPTU no parece posible. Pero si existen correlaciones entre presión máxima de consolidación y cohesión. La Figura 13 muestra una co-

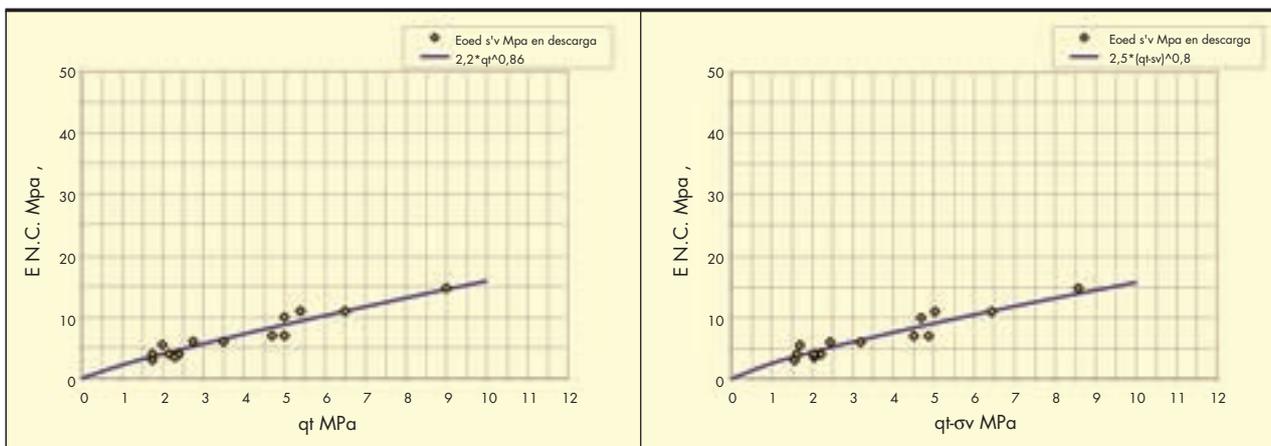


FIGURA 11. Resultado de ensayos en las “glinas” polacas y correlaciones propuestas para el modulo edométrico NC.

		Triaxial CU		Triaxial CD		Corte Directo	
		C' (Kpa)	φ	C' (Kpa)	φ	C' (Kpa)	φ
160+504	9001	14,23	20,66				
162+150	9002						
162+342	9003						
163+240	9004	6,78	35,10	60,84	32,43		
169+900	9005	6,78	35,10				
142+355	82/12/G/345					15,30	18,70
142+355	82/12/G/346					10,40	19,80
143+081	82/12/G/348					13,50	19,70
143+094	82/12/G/350					15,90	20,30
151+400	82/12/G/354					17,60	17,20
160+473	82/12/G/347					11,70	18,60
1030,00	82/12/G/352					35,80	21,80
1030,00	82/12/G/353					18,90	24,20

TABLA 2. Resultados de ensayos triaxiales y corte directo.

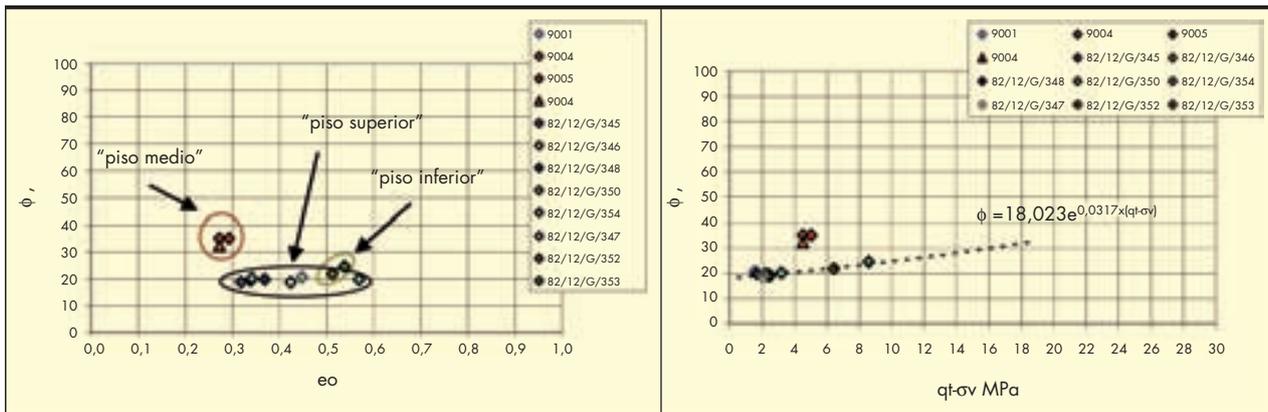


FIGURA 12. Resultado de ensayos de "resistencia Drenada" realizados en las "glinas" polacas.

relación ofrecida por Mesri and Abdel-Ghaffar (1993) y recogida por la FHWA en su report FHWA-IF-02-034 del año 2002. Con los puntos de las muestras aquí analizadas sobrepuestos, en virtud a las P'o que se han obtenido en los edómetros y a las cohesiones de sus ensayos de resistencia.

Se acepta un comportamiento similar con el que propone la fórmula de Mesri and Abdel-Ghaffar (1993):

$$C' \approx 0,024 * P'o$$

por lo que haciendo uso de la Figura 8 se define:

Pisos "superior e inferior"

$$\phi \approx 18 * e^{0,032 * (qt - \sigma_v)}$$

$$C' \text{ (Mpa)} = 0,00312 * (qt - \sigma_v)^2$$

Piso "Medio"

$$\phi \approx 32,5^\circ$$

$$C' \approx 7 \text{ Kpa}$$

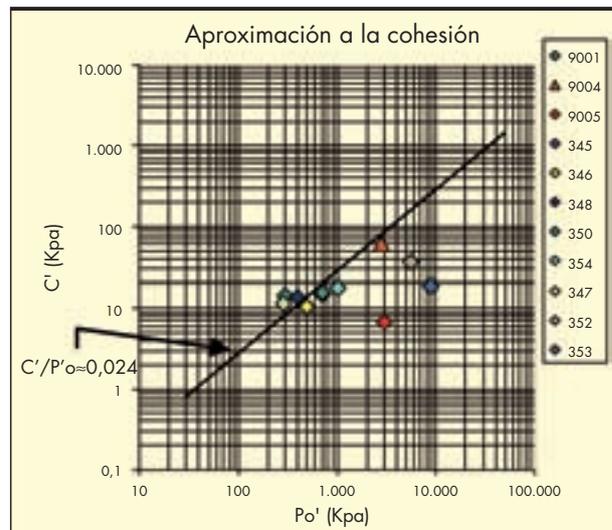


FIGURA 13. Relación entre Presión de preconsolidación aparente y cohesión del terreno.

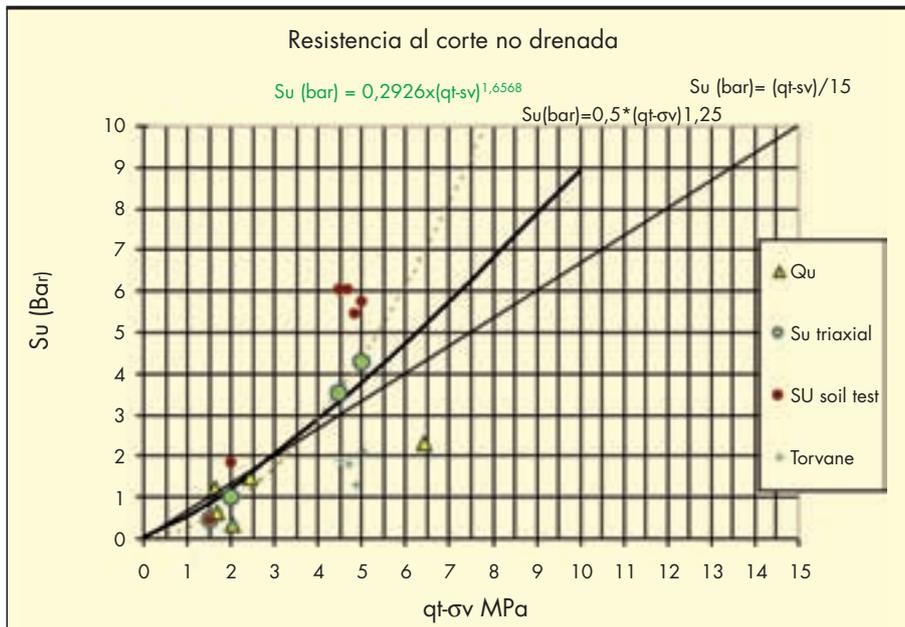


FIGURA 14. Resultado de ensayos de resistencia No Drenada realizados en las "glinas" polacas y correlación habitual $N_k=15$.

5.2. RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA "SU" E ÍNDICES DE FLUIDEZ "IF"

La Figura 14, muestra los ensayos de resistencia no drenada realizados. Se grafican tres ensayos triaxiales tipo CU (con "Su" interpretada en el valor correspondiente a la σ'_{vo} de la muestra), un ensayo triaxial UU, 5 ensayos de resistencia a la compresión simple (con $Cu=qu/2$) y cinco ensayos manuales realizados al abrir las muestras en el laboratorio tipos "Torvane" y "soil test". En resumen diferentes ensayos y por ello las "Su" no deben ser las mismas, con todo y que se sabe que entre estos ensayos los resultados más o menos se parecen.

En la gráfica se ha añadido la regresión típica de $(qt-sv)/15$ y la interpolación pura que darían los triaxiales. Por los ensayos de loading test realizados en los pilotes de la obra se acepta una interpretación intermedia como la que se grafica y que responde a:

$Su=0,5 * (qt-sv)^{1,25} (\text{Mpa})$

Con todo y que en los rangos bajos parece igualmente válida:

$qt-sv=1,5 \text{ a } 3,5 \text{ Mpa} \rightarrow Su = (qt-sv)/15$

También se evalúa la relación entre el índice de fluidez IF y el valor de resistencia del CPTU. Este parámetro es de gran trascendencia en Polonia ya que la Normativa de cálculo de cimentaciones profundas se basa en él. Además, es muy fácil y barato de comprobar con el propio detrito que se obtiene durante la excavación de pilotes y pantallas.

En este punto se vuelve de absoluta trascendencia la valoración de límites de Atterberg utilizada. Y de cara a las correlaciones utilizadas en Polonia será necesario hacer uso de la basada en límites obtenidos con la fracción que pasa por 2 mm, mientras que de cara a la usada en España se deberá realizar con la que pasa por 0,4 mm.

Fracción 2 mm (Normativa Polaca):

$IF \% \approx 0,39 - 0,225 * \ln(qt-sv) (\text{Mpa})$

Fracción 0,4 mm (Normativa SUCS):

$IF \% \approx 0,25 - 0,5 * \ln(qt-sv) (\text{Mpa})$

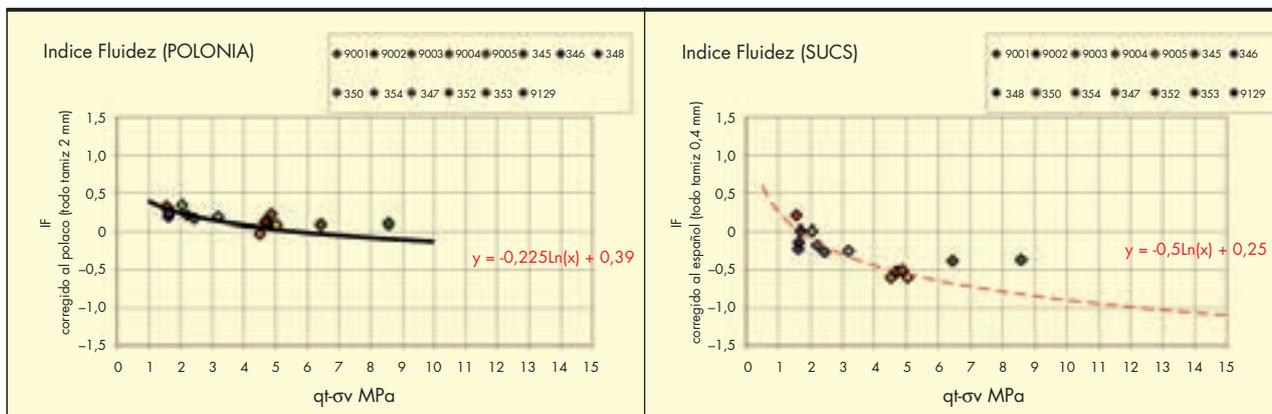


FIGURA 15. Relación entre el IF y el CPTU.

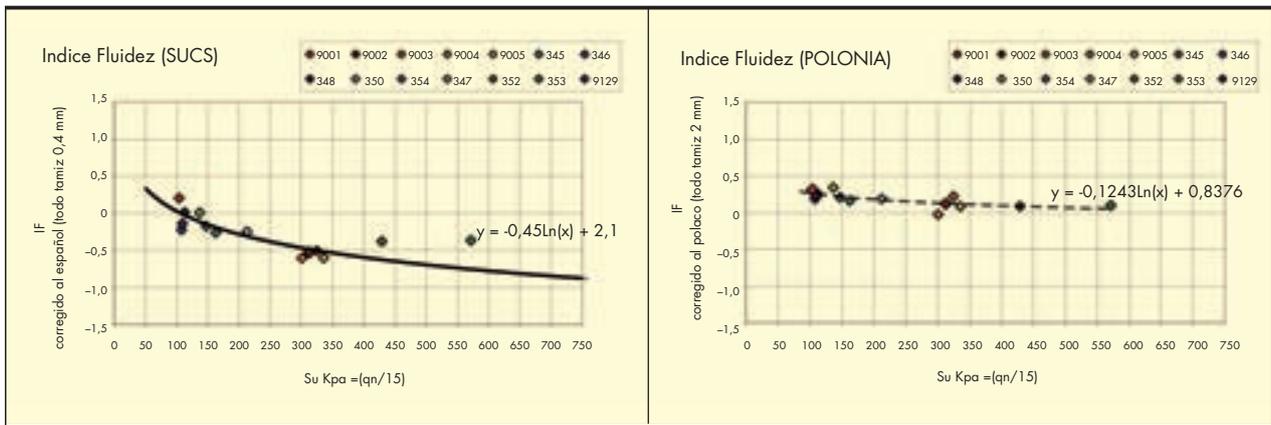


FIGURA 16. Relación entre el IF (USCS) y el valor de "Su" que se obtiene con el CPTU.

Se podrá obtener también la correlación con la resistencia al corte no drenada "Su", aceptando que $Su = (qt - \sigma_v) / 15$ (cosa que queda verificada para las "glinas" de esta zona, sobre todo las de $(qt - \sigma_v) < 4$ Mpa y que es conservador, como se ha visto, en las de $qn > 4$ Mpa). La Figura 16 muestra estas correlaciones.

La Figura 17 muestra la correlación a la resistencia al corte no drenada "Su" con la superposición del resultado obtenido en tres ensayos triaxiales tipo Consolidado y No Drenado hechos en las muestras, más el tipo UU.

SUCS → $IF \approx 2,1 - 0,45 * \ln(Su)$ // $Su (Kpa) = 106,34 * e^{-2,23 * IF}$

Polonia → $IF \approx 0,84 - 0,124 * \ln(Su)$ // $Su (Kpa) = 375 * e^{-6 * IF}$

6. CORRELACIÓN QT VS NSPT

Se dispone de muchos ensayos en la obra para establecer esta correlación con cierto grado de seguridad. En la Figura 18 se muestra la relación entre ambos ensayos con N_{spt} y con N corregido al 60% de energía.

En la Figura 18 izquierda se observa como existe cierta dispersión, condicionada fundamentalmente por el contenido de finos. En la media se define:

$qc (Mpa) = 0,25 * N_{spt}^{0,8}$

Hay que hacer mención a que este valor es muy similar al que O. Kara y Z. Gündüz, Sakarya University, Departamento of Civil Engineering, Turkey. publicaron para limos turcos de la población de Adapazari.

En todo caso se observan dos límites, el superior de las "glinas" más arenosas que es de $0,85 * N_{spt}^{0,8}$ y el inferior de las "glinas" más limosas y arcillosas es de $0,125 * N_{spt}^{0,8}$.

Estableciendo en las cartas de clasificación la naturaleza más o menos arenosa de las "glinas", sería fácil ajustar el valor entre la media y el umbral ($0,55 * N_{spt}^{0,8}$ para arenosas y $0,1875 * N_{spt}^{0,8}$, para limosas).

En la Figura 18 derecha se observa también como las "glinas" más arenosas se sitúan por encima de la media y las más limosas por debajo de esta. Se puede definir:

$qc/P_{atm} \approx 5,5 * N_{60}^{0,5}$

Al igual que en la Figura izquierda se puede definir que las "glinas" arenosas se ajustarán mejor a $10,25 * N_{60}^{0,5}$ y las limosas arcillosas a $4,25 * N_{60}^{0,5}$

En esta gráfica, una relación lineal que también sería satisfactoria sería:

$qc/P_{atm} \approx N_{60}$

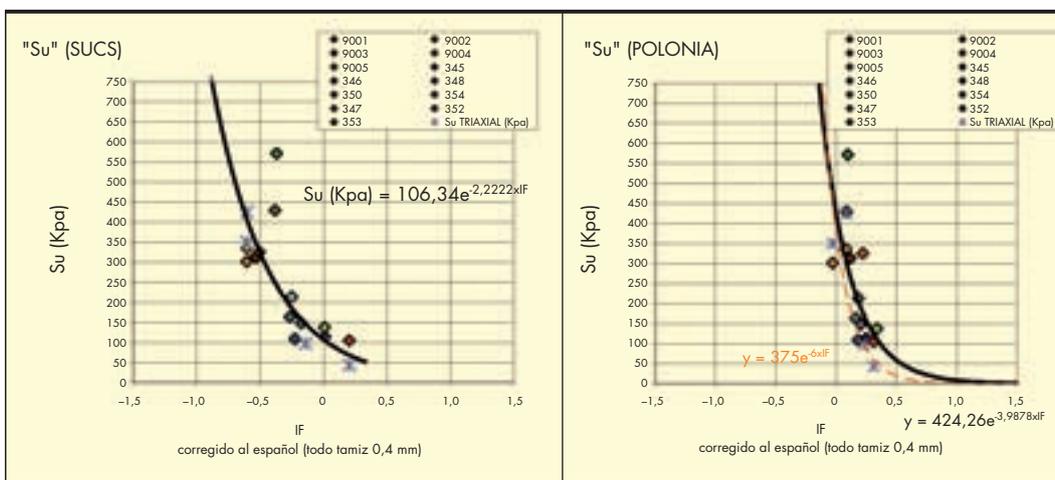


FIGURA 17. Relación entre el IF y el valor de "Su" que se obtiene con el CPTU y con los ensayos Triaxiales.

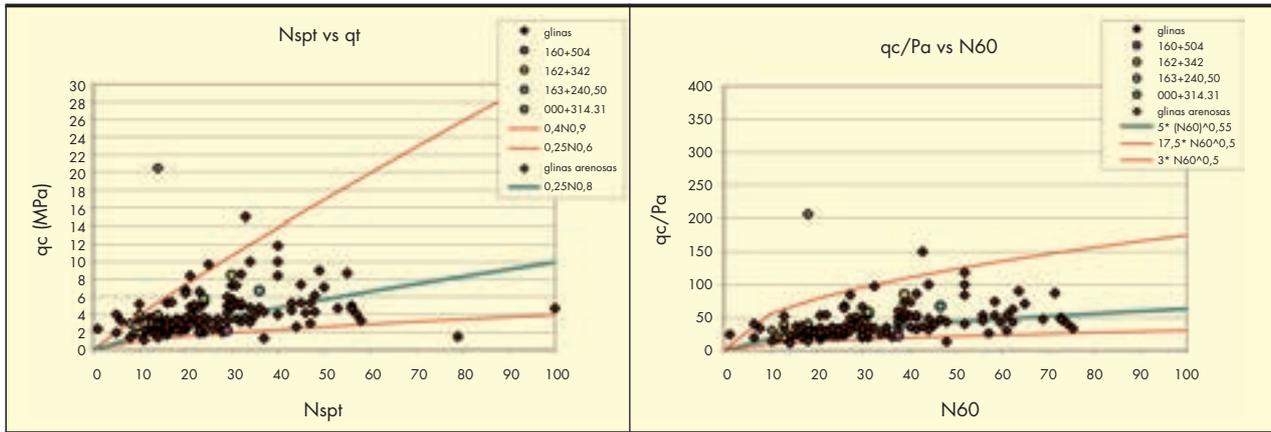


FIGURA 18. Resultado de ensayos en las “glinas” polacas y propuestas para la correlación con el Nspt.

7. CORRELACIÓN QUE SE ESTABLECE ENTRE EL MÓDULO EDMÓTRICO Y EL VALOR NSPT CON EL USO DEL CPTU

Haciendo uso de las correlaciones entre Nspt vs qt, a la vez que qt-σv vs Eoed se construye la gráfica de la Figura 19 que relacionará el módulo edométrico con el valor del ensayo Nspt.

Se acepta de otros estudios la correlación:

$$D_{OC} (Mpa) = 0,55 * N_{60}$$

Hay que hacer mención a que el estudio realizado en las “glinas” polacas es más extenso que el aquí presentado e incluye una serie de ensayos presiométricos, que permitían concluir una correlación igual a la aquí mostrada, pero desde correlaciones Pl vs Nspt y Pl vs Edómetros, por lo que, con todo y ser el ensayo SPT muy poco adecuado a este tipo de correlaciones, se puede aceptar la correlación propuesta como una aproximación primera al módulo en descarga.

8. COMPARATIVAS

Con las formulaciones descritas se puede analizar el CPTU “tipo” propuesto en la Figura 4. En las figuras se muestra, respecto a las consideraciones “clásicas”, las nuevas fórmulas que se proponen y se han diferenciado como “C-A”.

La Figura 20 muestra como la presión de sobreconsolidación considerada es claramente inferior a lo “habitual” en valores de qt < 3 Mpa, pero sería mayor para valores de qt > 4 Mpa.

En el módulo en descarga (OC) se propone un valor claramente inferior y que marca más la diferencia cuanto mayor es qt. En el módulo de carga (NC) el efecto es el mismo pero la diferencia entre valores es pequeña.

La Figura 21 muestra las estimaciones de ángulo de rozamiento, cohesión, índices de fluidez y especialmente interesante, la resistencia al corte no drenada (Su). En ésta, se observa como en valores bajos no hay diferencias importantes

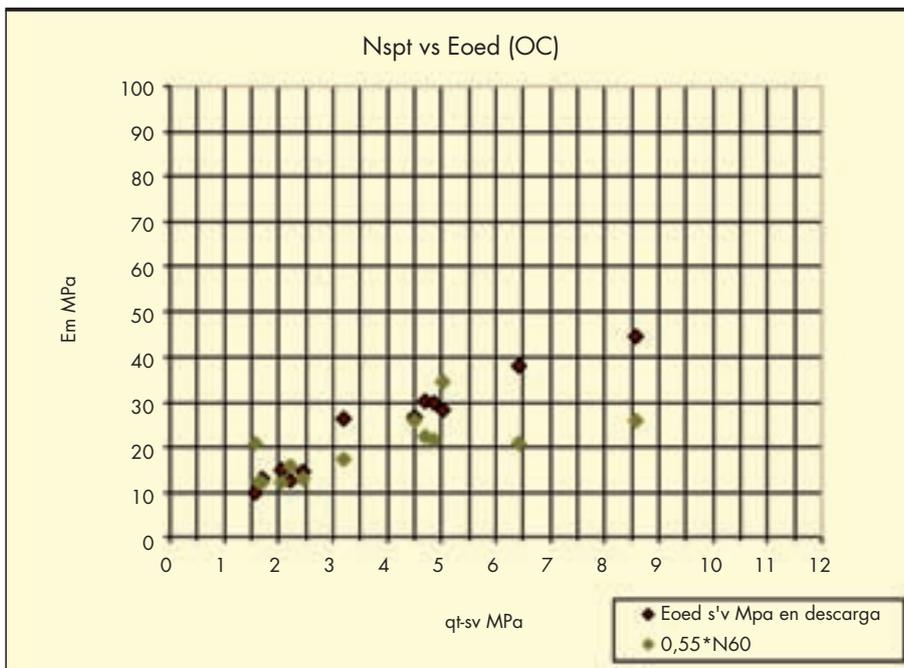


FIGURA 19. Correlación entre Nspt y módulo edométrico de descarga-recarga.

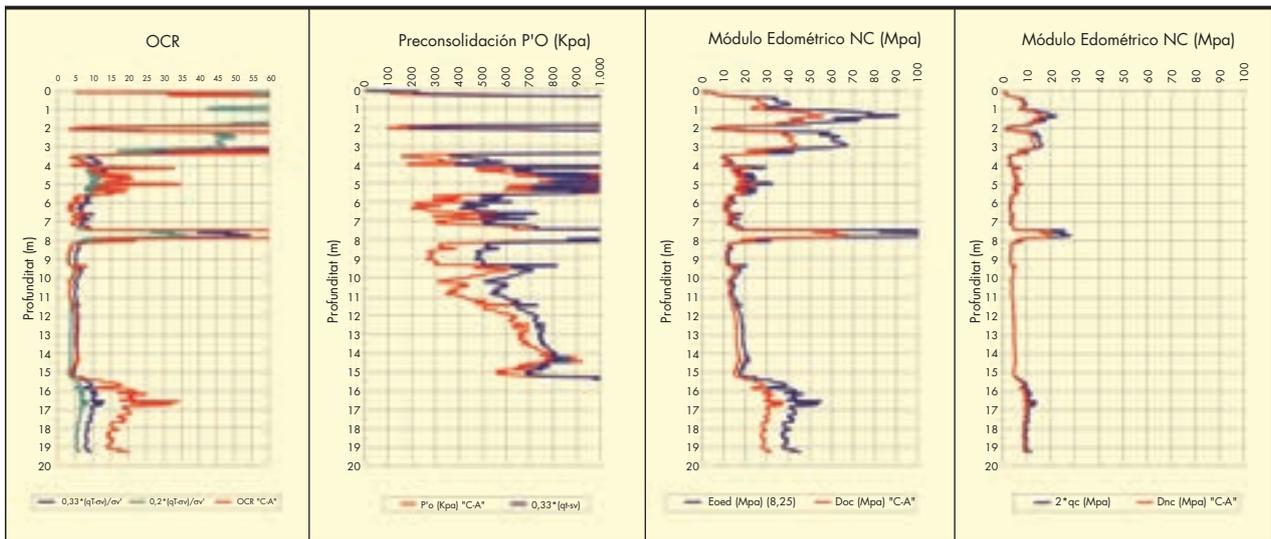


FIGURA 20. Correlaciones para el ensayo WS-5.1.

con $(qt-\sigma_v)/15$, pero a partir de $qt > 4$ Mpa, la diferencia ya es importante.

9. CONCLUSIONES

1. En la denominación polaca de “**glinas**”, hay que valorar los materiales que la nomenclatura anglosajona define como parte de las **SM, SC y CL, ML-CL**. En la obra utilizada para el presente artículo se obtienen materiales producto de la mezcla aproximadamente proporcional de are-

nas y limos que suele estar caracterizado por $40\% < I_p < 60\%$ y $7 < I_p < 12$ (SUCS).

2. Se proponen las correlaciones en la Tabla 3 para este tipo de terrenos sobreconsolidados $OCR=2,8$ a 45 .
3. Cabe preguntarse la validez del ensayo CPTU en terrenos que no sean puramente arenas, cuando las resistencias de punta superan los $3,5$ Mpa. La experiencia en esta obra invita a considerar el ensayo presiométrico como más fiable en este tipo de suelos relativamente rígidos.

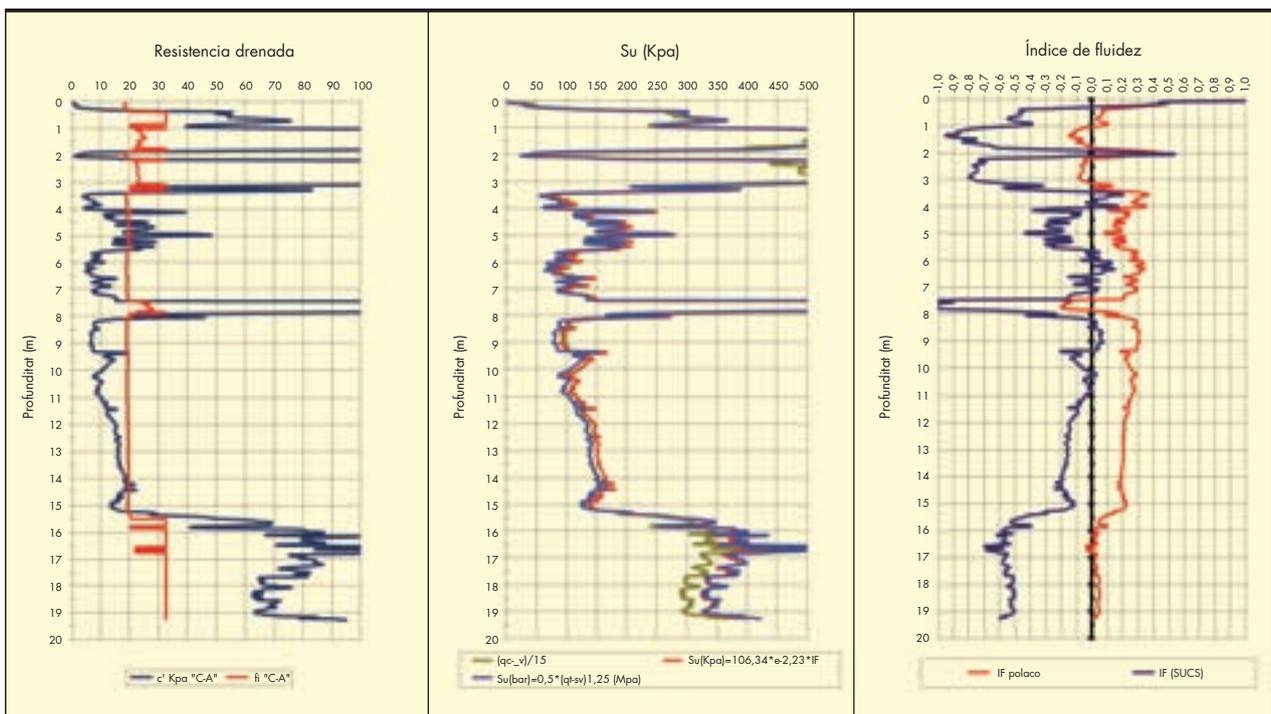


FIGURA 21. Correlaciones para el ensayo WS-5.1.

CORRELACIONES DE PARÁMETROS CON CPTU				
Parámetro correlacionado	Símbolo usado	Correlación	Rango aplicación	Autor
PRESIÓN SOBRE-CONSOLIDACIÓN APARENTE	P' _o	P' _o (Kpa)=0,33*(qt-σ _{vo}) ^{0,95}	qt-σ _{vo} = 0 a 3,5 Mpa	Mayne 2009
		P' _o (Mpa)=0,13*(qt-σ _{vo}) ²	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
GRADO DE SOBRE-CONSOLIDACIÓN	OCR	O.C.R.=0,33*(qt-σ _{vo}) ^{0,90} /σ' _{vo}	qt-σ _{vo} = 0 a 3,5 Mpa	Mayne 2009
		O.C.R.=0,13*(qt-σ _{vo}) ² /σ' _{vo}	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
		O.C.R.=0,065*Qt ²	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
MODULO EDOMÉTRICO EN DESCARGA-RECARGA	Doc//Er//Eoc	Doc (Mpa)=8,25*(qt-σ _{vo}) ^{0,80}	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
MODULO EDOMÉTRICO EN CARGA	D _{NC} / E _{NC}	DNC NC (Mpa)=2,5*(qt-σ _{vo}) ^{0,80}	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
		DNC NC (Mpa)=2,2*(qt) ^{0,86}	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
ÁNGULO DE ROZAMIENTO	φ	φ=18*e ^{0,032*(qt-σ_v)}	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
COHESIÓN	C'	C' (Mpa)=0,00312*(qt-σ _v) ²	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA	S _u	S _u (Mpa)= (qt-σ _v)/15 (Mpa)	qt-σ _{vo} = 0 a 3,5 Mpa	Esopt 74-82
		S _u (bar)=0,5*(qt-σ _v) ^{1,25} (Mpa)	qt-σ _{vo} = 0 a 10 Mpa	c-a
ÍNDICE DE FLUIDEZ (N. POLACA)	IF	IF %=0,39-0,225*Ln(qt-σ _v) (Mpa)	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
ÍNDICE DE FLUIDEZ (S,U,C,S)	IF	IF %=0,25-0,5*Ln(qt-σ _v) (Mpa)	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
N _{spt}	N _{spt}	q _c (Mpa)=0,25*N _{spt} ^{0,8}	qt-σ _{vo} = 1,5 a 10 Mpa	c-a
OTRAS CORRELACIONES OBTENIDAS DE MANERA INDIRECTA				
Parámetro correlacionado	Símbolo usado	Correlación	Autor	
S _u vs IF (N. POLACA)	S _u	S _u (Kpa)=375*e ^{6*IF}	c-a	
S _u vs IF (S.U.C.S.)	S _u	S _u (Kpa)=106,34*e ^{2,23*IF}	c-a	
E _{oc} vs N ₆₀	Doc	Doc=0,55*N ₆₀ (*)	c-a	

TABLA 3. (*) Válido cuando q_c=0,25N_{spt}^{0,8}.

10. BIBLIOGRAFÍA

Chang, M.F. 1988. In-situ testing of residual soils in Singapore. *Proceedings 2nd International Conference Geomechanics in Tropical Soils*. V1 97-108, Singapore.

Fellini, Bengt H. 2009-march. Basic of fundatiom Design. Electronic Edition.

FHWA: report FHWA-IF-02-034 del año 2002.

Kulhawy, F.H, Mayne, P.W. August 1990. Manual on Estimating Soil Proprieties for Foundation Design. EL-6800. Research project 1493-6. Final Report. Cornell University, Geotechnical Engineering Group. Hollister Hall. Ithaca. New York 14853-3501.

Mayne, P.H. Characterisation and Engineering proprieties of natural Soils. Vol 3. editors Tan, TS., Phoon, K.K, Leroueil, S. 2008. 57 pp.

Mayne, P.H. 2008. Piezocone profiling of clays for maritime site investigations. Georgia Institute of Technology, Civil and Environmental Engineering Faculty, Atlanta, Georgia, USA. 11th Baltic Sea Geotechnical Conference-Geotechnics in marine Engineering. Gdansk, Poland.

Mayne, P.H. 2009. 17th ICSMGE Alexandria 2009.

Mesri, G. and M.E.M. Abdel-Ghaffar, 1993. Cohesion intercept in effective stress-stability analysis. *J. Geotech. Eng.*, 119(8): 1229-1249.

Mitchell, J. K. & Gardner, W. S. (1975). In situ measurement of volume change characteristics, *Proceedings, Conference on in situ measurement of soil properties*, ASCE speciality conference, state-of-the-art-paper, Raleigh, N.C., Vol. 2, pp. 279-345.

Powell, John J.M. 2005. use of CPTU data in clays/fine grained soils. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXVII, No. 3-4, Building Research Establishment, U.K. TOM LUNNE Norwegian Geotechnical Institute.

PTG 2008: Polskie Towarzystwo Gleboznawcze. *Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych*. 2008.

Robertson, P. K. *et al.* 1983. SPT-CPT Correlations. In *ASCE, Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 109, No.11:1449-1459, ISSN. 0733-9410. New York.

K.Senneset, R. Sandven and N. Janbu (1989): The evaluation of soil parameters from piezocone tests. *Symposium on In situ testing of soil properties for transportation facilities*. National Research Council, Washington D.C.

11. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a DRAGADOS SA. La oportunidad que nos ha dado para analizar todos estos ensayos. Especialmente a Juan Manuel Ruiz, Germán Martínez y Albert Pérez.

Estudio en modelo físico 3D del comportamiento de la Playa del Castillo de San Cristóbal (Isla de Gran Canaria)

M. A. RODRÍGUEZ GIL (*), J. F. SÁNCHEZ GONZÁLEZ (**),
A. LECHUGA ÁLVARO (***) y R. M. GUTIÉRREZ SERRET (****)

RESUMEN La Dirección General para la Sostenibilidad de la Costa y del Mar (DGSCM) tiene prevista la realización de una actuación en la Playa del Castillo de San Cristóbal en la Isla de Gran Canaria. El objeto de esta actuación es la creación de una playa de arena encajada entre dos diques laterales. Para ello la DGSCM encargó al CEDEX la realización de una serie de ensayos en modelo físico 3D de dicha actuación en el tanque de oleaje multidireccional del Centro de Estudios de Puertos y Costas, con el fin de estudiar la estabilidad de los diques proyectados para la defensa de la playa frente a oleajes extremos, así como el comportamiento de la playa ante oleajes medios. En el presente artículo se recogen los resultados obtenidos en el estudio del comportamiento de la playa.

3D PHYSICAL MODEL TESTS OF THE SAN CRISTOBAL BEACH (GRAN CANARIA ISLAND)

ABSTRACT *The Dirección General para la Sostenibilidad de la Costa y del Mar (DGSCM) plans to carry out a performance at the Playa del Castillo de San Cristóbal (Gran Canaria Island). The aim of this performance is to create a beach between two breakwaters. For this, the CEDEX was carried out a series of 3D physical model tests of the San Cristobal beach on the multidirectional wave tank of the CEDEX, in order to study the stability of the two rubble mound breakwaters and the behavior of the beach. This paper presents the results obtained in the study of the behavior of the beach.*

Palabras clave: Ensayos en modelo físico, Playa, Línea de orilla, Diques.

Keywords: Physical models, Beach, Coastlines, Rubble mound breakwaters.

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección General para la Sostenibilidad de la Costa y del Mar tiene proyectada una actuación en el sur de la capital de la Isla de Gran Canaria, en el barrio de San Cristóbal (Figura 1). Esta actuación incluye la creación de una playa de arena, encajada entre dos diques laterales, y el recrecimiento de la playa de gravas que actualmente está apoyada al norte del castillo (Figura 3).

Con objeto de estudiar la estabilidad de los diques proyectados para la defensa de la playa frente a oleajes extremos, así como el comportamiento de la playa ante oleajes medios, la DGSCM encargó al CEDEX el estudio mediante ensayo en modelo físico de la actuación proyectada. Estos ensayos fueron llevados a cabo entre julio y diciembre de 2011 en el tanque de oleaje multidireccional del Centro de Estudios de Puertos y Costas.

2. SOLUCIÓN PROYECTADA. ALTERNATIVAS ENSAYADAS

A continuación se describirá las distintas alternativas ensayadas a lo largo de este estudio, justificando las modificaciones que se han ido realizando en cada caso.

2.1. ENSAYO 1

La Figura 3 presenta la planta de la obra según proyecto. En el tramo principal de la actuación se prevé una playa de arena abrigada por sendas estructuras laterales. Para ello, el proyecto planteaba la ejecución de dos diques laterales (dique norte y dique sur) que contendrían 210.000 m³ de sedimento en una playa de arena, de los cuales 66.000 m³ (zona activa de la playa) debían tener un tamaño medio de 1 mm. Asimismo, entre el Castillo y el dique sur se preveía una segunda zona de actuación, mediante el acondiciona-

(*) Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios de Puertos y Costas. C/Antonio López, nº81, 28026 Madrid. E-mail: angeles.rodriguez@cedex.es

(**) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Coordinador de Programa Técnico – Científico. Centro de Estudios de Puertos y Costas. C/Antonio López, nº81, 28026 Madrid. E-mail: jose.F.Sanchez@cedex.es

(***) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director de la Unidad de I+D+i. Centro de Estudios de Puertos y Costas. C/Antonio López, nº81, 28026 Madrid. E-mail: Antonio.Lechuga@cedex.es

(****) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director del Laboratorio de Experimentación Marítima. Centro de Estudios de Puertos y Costas. C/Antonio López, nº81, 28026 Madrid. E-mail: Ramon.M.Gutierrez@cedex.es



FIGURA 1. Localización de la zona de estudio.



FIGURA 2. Zona de actuación.

miento de una playa de gravas (necesarias al no contar con el abrigo del que se dota a la playa de arena).

El dique norte tiene una sola alineación recta de 250 m de longitud, aproximadamente perpendicular a las batimétricas, y tiene el morro a la cota -5 m. En el lado sur se prevé un dique en "L" formado por dos alineaciones de 160 y 150 m respectivamente, la primera arrancando desde la costa en dirección aproximadamente perpendicular a la misma y la segunda paralela a la costa y cimentada entre las cotas -4 y -5 m.

Tanto el dique norte como el dique sur están compuestos por varias secciones tipo de tipología convencional (con núcleo y filtros). Todos los taludes, exteriores e interiores, son $H/V = 3/2$.

Las características generales de estos diques consistieron, tras la modificación del proyecto inicial, en:

- Cota de coronación en el arranque de las estructuras $+5,0$ m.
- Dique sumergido con manto de escolleras de 2 y 3 t y coronado a la $-1,00$ m.

- El dique norte está compuesto por bloques cúbicos de hormigón con pesos de 9 (en la zona de profundidad menor de 3,5 m) y 16 t (en la zona de profundidad mayor de 3,5 m).
- Por motivos constructivos, se fijaron dos cotas de coronación constantes ($+5$ m y $+4$ m, en función de la necesidad de apoyo del perfil de la playa) con un tramo de transición corto entre ambas (20 m de longitud). También se fijó el ancho de la coronación en 9 m a lo largo de toda la estructura (excepto en el tramo sumergido del dique sur).

En los siguientes epígrafes se exponen las soluciones ensayadas a lo largo de este trabajo, en el marco de los estudios del comportamiento de la playa.

2.2. ENSAYOS 2 Y 3 (PRIMER ENSAYO DE COMPORTAMIENTO DE LA PLAYA)

Tras la realización del Ensayo 1 se comprobó que en el morro de las dos estructuras laterales (dique norte y dique sur) se

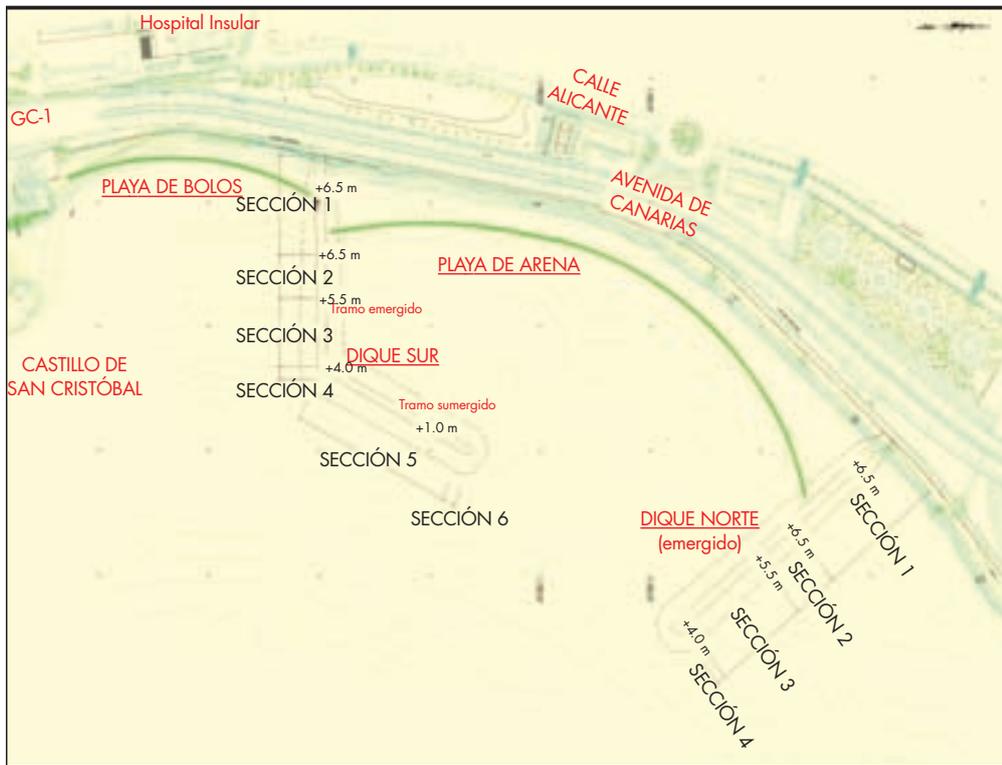


FIGURA 3. Planta de las obras según proyecto.

producían averías importantes, lo que llevó a modificar las secciones tipo 3 y 4 (Figura 3) de ambas estructuras, aumentándose el peso de los bloques a 25 t, en lugar de las 16 t del Ensayo 1. La cota de coronación se mantuvo con objeto de no modificar las condiciones hidrodinámicas, lo que obligó a reducir el espesor de las capas interiores. Las secciones 1 y 2 de ambas estructuras (dique norte y sur), así como el dique sumergido no sufrieron avería alguna, por lo que no se realizaron modificaciones.

2.3. ENSAYOS 4, 5 Y 6 (SEGUNDO Y TERCER ENSAYO DE COMPORTAMIENTO DE LA PLAYA)

A propuesta de la DGSCM a la vista de los resultados obtenidos en el Ensayo 3 con acumulaciones de arena cerca del morro del dique sur, se modificó la geometría del dique sur. Las modificaciones sólo afectaron a las secciones 3 y 4 del tramo emergido del dique, y se resumen en dos puntos:

- Ambas secciones pasan a estar coronadas a la cota +2 m.
- Aprovechando el aumento de estabilidad por ser más rebasable el dique, se redujo el peso de los bloques del manto, pasando de 25 t a 9 t. De esta forma, todo el manto del dique sur pasó a estar constituido por bloques de 9 t.

2.4. ENSAYOS 8 Y 9

El objeto de estos ensayos fue el estudio de la estabilidad de las estructuras laterales. Sin embargo, es necesario hacer referencia a estos ensayos de cara al estudio del comportamiento de la playa, ya que en ellos se introdujo una modificación que afecta al comportamiento de la playa, y que consistió en la ampliación del dique sumergido hasta el morro del dique norte.

Aunque los ensayos 8 y 9 presentan diferencias de cara al comportamiento de las estructuras, de cara al comportamiento de la playa ambos ensayos se pueden considerar como una repetición. Por otro lado, ya que se trata de ensayos planificados para el estudio de la estabilidad no se incluyen en este artículo la evolución de la línea de orilla. Sin embargo, sí se ha realizado un análisis del efecto que la ampliación del dique sumergido tiene en la salida del material en la zona comprendida entre el dique sumergido y el dique norte.

3. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ENSAYOS

Los ensayos se han realizado en el tanque multidireccional del Laboratorio de Experimentación Marítima del CEDEX (Figura 4), por su sistema de generación de oleaje y dimensiones, que permiten reproducir los oleajes seleccionados para el ensayo. Las principales características de esta instalación son:

1. Dimensiones: 34 x 26 x 1,6 m.
2. Generador de oleaje:
 - a) 72 paletas de tipo pistón independientes de 1,60 m de altura y 0,40 m de anchura, de manera que el frente total generado es de 28,80 m.
 - b) Actuadores eléctricos con 0,60 m de recorrido.
 - c) Altura máxima de ola posible: 0,58 m para frente plano regular.
3. Sistema de control: ordenador principal conectado mediante red ETHERNET a servo-ordenadores modulares para el control digital de los actuadores.
4. Atenuación lateral de energía del oleaje mediante paneles de chapa perforada.
5. Análisis y síntesis del oleaje. Aplicación: GEDAP, National Research Council.

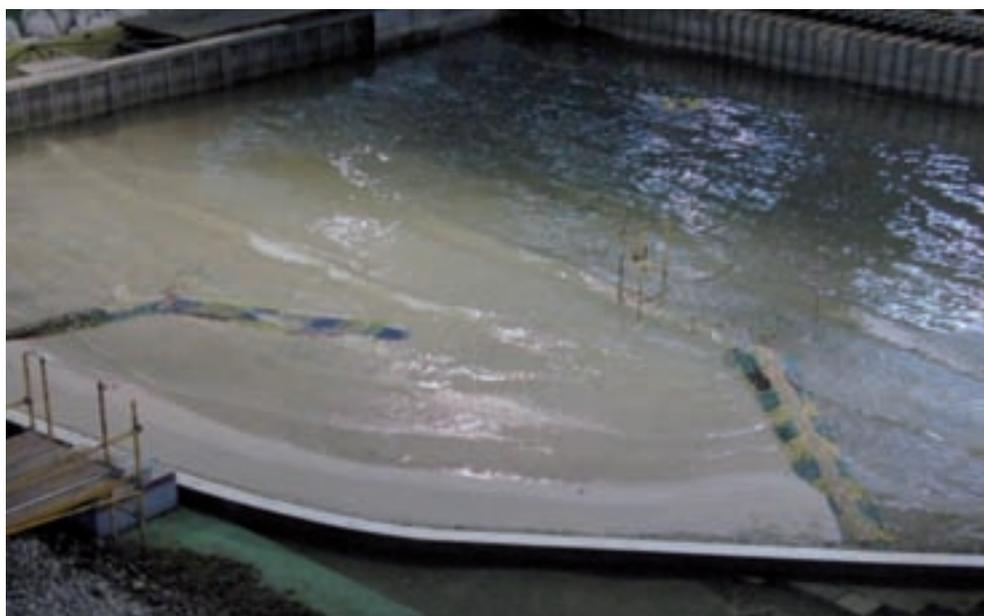


FIGURA 4. Tanque de oleaje multidireccional. Vista del ensayo.

Denominación	MODELO		PROTOTIPO	
	Peso (gr)	(gr/cm ³)	Peso (t)	(t/m ³)
Bloque cúbico de 9 t	145	2,20	8,70	2,30
Bloque cúbico de 16 t	266	2,20	~16	2,30
Bloque cúbico de 25 t	421	2,20	25,30	2,30
Escollera de 1-2 t	15-30	2,61	~1-2	2,65

TABLA 1. Elementos empleados para el modelo y pesos en prototipo ($\lambda=40$).

En la Tabla 1 se muestran las características de los elementos utilizados para la reproducción de los tramos de dique considerados en los ensayos.

Según los datos proporcionados en el proyecto por la DGSCM, el árido con el que se llevará a cabo la regeneración de la playa objeto de este estudio tiene un diámetro medio nominal aproximado $D_{n50} = 1\text{mm}$. Este tamaño se ha reproducido igualando la velocidad adimensional de caída del sedimento (también llamado número de Dean) en modelo y prototipo, obteniéndose así un valor del diámetro del grano en modelo $d_{50} = 0,17\text{mm}$.

Para la determinación de los oleajes máximos de ensayo se han empleado los cálculos del oleaje de diseño realizados en el proyecto de la DGSCM. Según este estudio, la al-

tura de ola significativa de cálculo, a la profundidad máxima de la obra (cota -5m), y para el periodo de retorno considerado ($T_R = 113\text{años}$) es $H_{s,cál.} = 3,6\text{m}$, altura de ola significativa máxima en la zona, ya que está limitada por fondo.

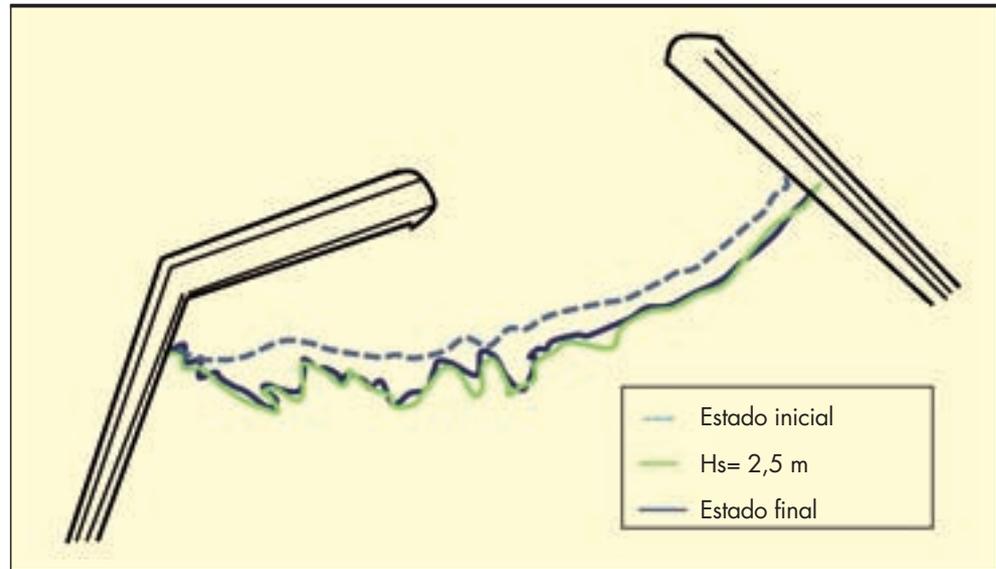
En la Tabla 2 se resumen las principales características de los oleajes de ensayo.

Todos los ensayos se han llevado a cabo con nivel de agua variable. La amplitud de marea se ha fijado en los ensayos de estabilidad de las estructuras y se han mantenido para los ensayos de funcionamiento de la playa. Así pues, los niveles máximo y mínimo se han determinado considerando solamente la carrera de marea astronómica, cuya amplitud máxima en la zona es de unos 3m .

Ensayo	HS (m)	s_{OP}	θ	Nivel de marea (*)
3	0,5 - 2,5	0,013 - 0,020	-25°	Variable (B -M -P -M)
5	1,5 - 3,5	0,020	-25°	Variable (B -M -P -M)
6	1,5 - 2,5	0,004	$-27,5^\circ$	Variable (B -ML -P -MV)

TABLA 2. Características de los oleajes ensayados en el estudio de comportamiento de playa.
(*) B: bajamar; ML: Media llenante; P: pleamar; MV: media vaciante; M: media con nivel fijo.

FIGURA 4.1. Evolución de la línea de orilla en bajamar. Ensayo 3. Estado final. ($H_{sm\acute{a}x}$ alcanzada en el ensayo 3 = 2,7 m).



4. EVOLUCIÓN DE LA LÍNEA DE ORILLA

A continuación se representan sobreimpresas, en las fotografías cenitales de la playa, las líneas de orilla en bajamar y en pleamar observadas en tres momentos a lo largo de los ensayos 3, 5 y 6.

4.1. ENSAYO 3

En las dos figuras que se presentan (Figuras 4.1 y 4.2), se representa el estado de la playa después de reproducir cuatro días de oleaje tipo SEA en dos fases, una fase creciente, hasta llegar a alturas de ola significantes máximas de 2,5 m, para posteriormente reproducir otros dos días de oleaje tipo SEA de altura decreciente.

Como puede observarse en las fotografías (Figuras 4.1 y 4.2), la evolución de la línea de orilla es distinta en las dos situaciones analizadas (bajamar y pleamar). Así, mientras en bajamar se produce un retroceso de la línea de orilla, en pleamar

esta permanece prácticamente inalterada tras haber sometido a la playa al temporal de ensayo.

La Figura 4.3 muestra como se produce la variación del perfil de playa durante los ensayos. Por un lado, la cresta se forma como consecuencia de los mayores remotes y el depósito de arena en la parte superior de su perfil, mientras que la parte inferior de este perfil se erosiona como consecuencia del descenso (run-down) y corrientes de resaca generadas en la playa, que tienden a desplazar materiales hacia el mar por el fondo.

En las fotografías (Figuras 4.4 y 4.5) también puede verse, además, un desplazamiento del material hacia el dique sur y sumergido, abandonando la playa a través del dique sur, hacia la playa de gravas.

Por otro lado, en la zona comprendida entre el dique sumergido y el dique norte, y como se puede observar en las fotografías, se produce también una salida del material hacia el mar.

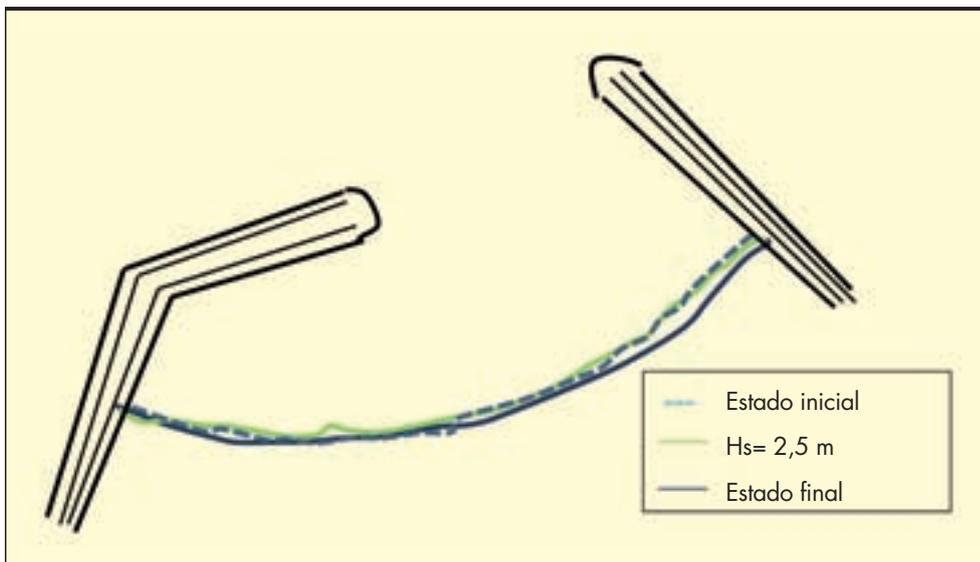


FIGURA 4.2. Evolución de la línea de orilla en pleamar. Ensayo 3. Estado inicial (arriba); $H_s = 2,5$ m (centro); estado final (abajo). ($H_{sm\acute{a}x}$ alcanzada en el ensayo 3 = 2,7 m).

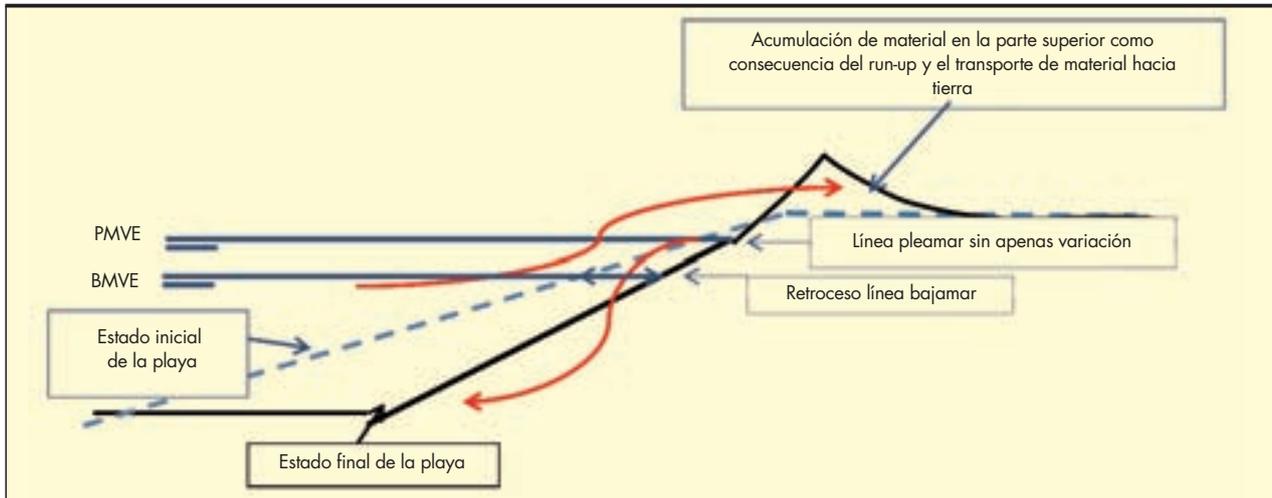


FIGURA 4.3. Esquema con la tendencia observada en la evolución del perfil de playa.

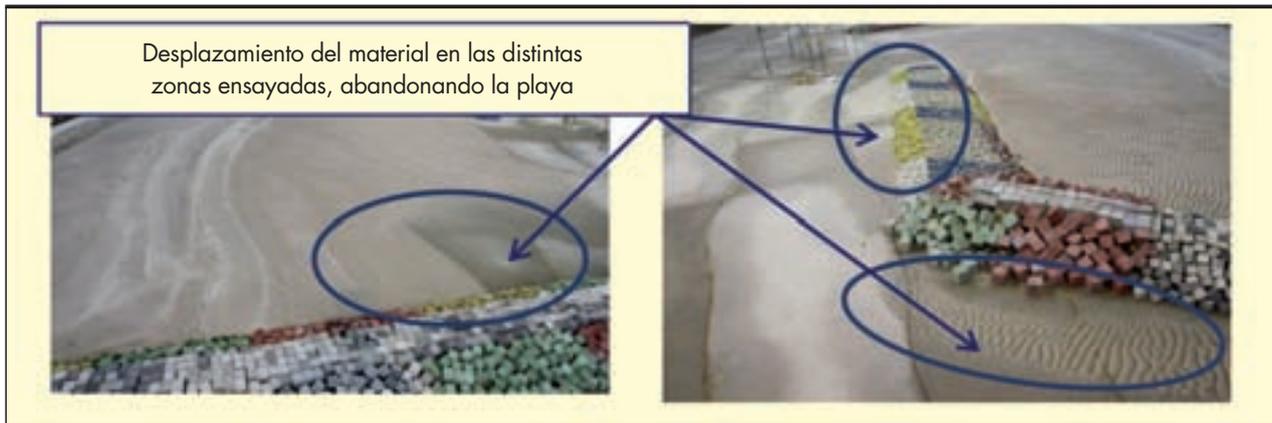


FIGURA 4.4. Ensayo 3. Detalle de la playa: zonas donde se produce la salida del material. Estado inicial.



FIGURA 4.5. Ensayo 3. Detalle de la acumulación de material en el dique sur. Estado final.

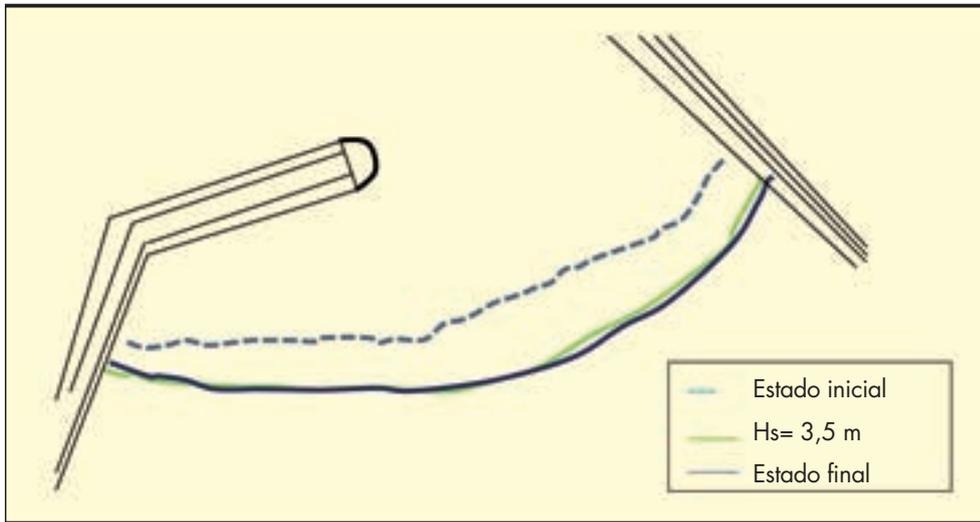


FIGURA 4.6. Evolución de la línea de orilla en bajamar. Ensayo 5. Estado inicial (arriba); $H_s = 3,5$ m (centro); estado final (abajo). ($H_{smáx}$ alcanzada en el ensayo 5 = 3,5 m).

En cualquier caso, esta fuga de material es menor que en el ensayo 5, tal y como se explica en el siguiente apartado.

4.2. ENSAYO 5

En las Figuras 4.6 y 4.7, **se representa** el estado de la playa después de reproducir dos días de oleaje tipo SEA en dos fases, una fase creciente, hasta llegar a alturas de ola significantes máximas de 3,5 m, para posteriormente reproducir otros dos días de oleaje tipo SEA de altura decreciente.

En este ensayo, y como ocurrió en el ensayo 3, la evolución de la línea de orilla es distinta en bajamar y pleamar. De esta forma, mientras en bajamar se produce un retroceso importante hacia tierra de la línea de orilla (mayor incluso que en el ensayo anterior), en pleamar ésta permanece prácticamente inalterada.

Estos resultados muestran un comportamiento similar del perfil en los ensayos 3 y 5, aunque su transformación es algo mayor en el segundo caso, debido a que la altura de ola máxima de ensayo también es superior. En efecto, también son mayores las acumulaciones en la cresta de la playa, como se

puede ver en la Figura 4.8, donde la cresta se aprecia con claridad a lo largo de toda la playa.

Con respecto al transporte longitudinal, las acumulaciones en torno al dique sur han disminuido con respecto al ensayo 3 (lo que se deduce del retroceso de la línea de orilla de bajamar en el apoyo en el dique sur). Parece, por tanto, que las modificaciones realizadas han surtido efecto. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la salida de la arena por esta zona de la playa también ha aumentado, al reducirse la cota de coronación.

4.3. ENSAYO 6

Siguiendo el mismo esquema de los ensayos 3 y 5, en primer lugar se presentarán las fotografías de la evolución del estado de la playa. De esta forma, (Figuras 4.9 y 4.10), **se representa** el estado de la playa después de reproducir dos días de oleaje tipo SWELL en dos fases, una fase creciente, hasta llegar a alturas de ola significantes máximas de 2,5 m, para posteriormente reproducir otros dos días de oleaje tipo SEA de altura decreciente. Este ensayo se llevó a cabo sin modificar el perfil de playa obtenido tras la finalización del ensayo 5, ya

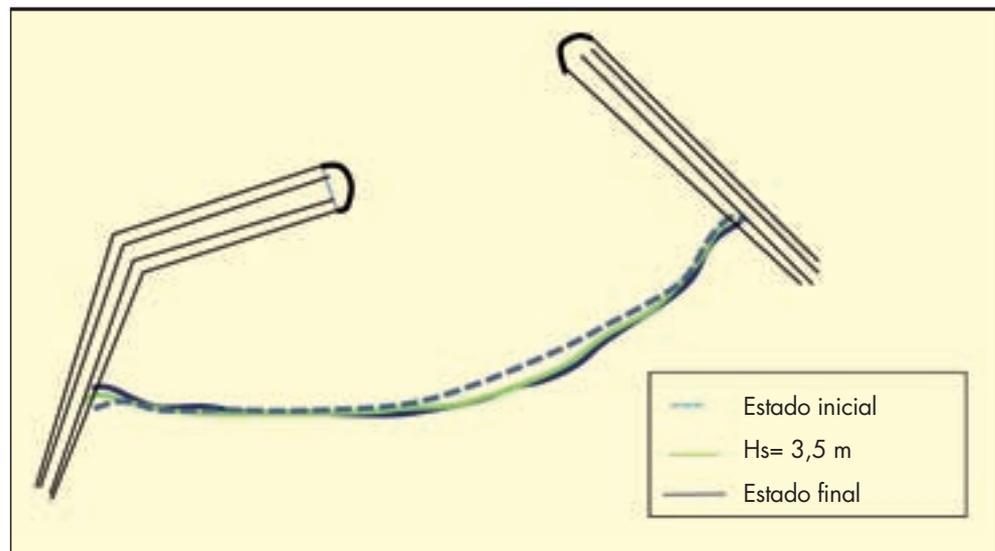


FIGURA 4.7. Evolución de la línea de orilla en pleamar. Ensayo 5. Estado inicial (arriba); $H_s = 3,5$ m (centro); estado final (abajo). ($H_{smáx}$ alcanzada en el ensayo 5 = 3,5 m).

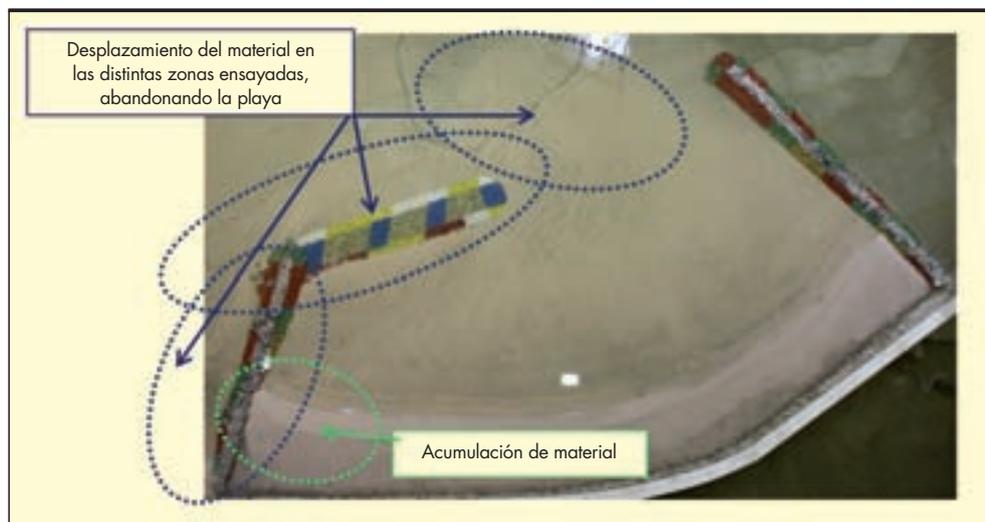


FIGURA 4.8. Ensayo 5. Vista general de la playa. Zonas donde se produce el abandono del material. Estado final. $H_s = 3,5$ m.

que constituye una continuación de dicho ensayo anterior, a pesar de haberse llevado a cabo el análisis de los resultados de una manera separada. La diferencia con el ensayo 5 radica en el oleaje generado, siendo en este caso un oleaje propagado desde otras áreas de generación lejanas y que, por ser éste característico de las Islas Canarias, se considera conveniente su estudio.

En el ensayo 6, se observa la misma tendencia descrita en los ensayos 3 y 5 para la situación de pleamar, es decir, la línea de orilla se mantiene prácticamente inalterada al final del ensayo, mientras que en bajamar se produce, al contrario de lo observado en los ensayos 3 y 5, un incremento del ancho de playa (hay que recordar que se partía de una situación de erosión).

La cresta de la playa permanece prácticamente constante tras la finalización del ensayo. En este caso, y a diferencia de lo ocurrido en los ensayos 3 y 5 anteriores, no se observa una acumulación de material en el borde de la cresta, sino más bien el efecto contrario, tras someter a la playa al temporal de ensayo se observa, que el borde de la cresta es más tendido que en el estado inicial.

Con respecto a la salida de material por la zona sur, en este ensayo continúa observándose salida del material a tra-

vés del dique sur y por encima del dique sumergido, así como a través del área comprendida entre el dique sumergido y el dique norte, tal y como ocurría en el ensayo 5.

4.4. ENSAYOS 8 Y 9

Como se ha expuesto anteriormente, el objeto de estos dos ensayos fue el estudio de la estabilidad de las estructuras laterales. Sin embargo, y de cara al estudio del comportamiento de la playa, es necesario hacer un breve análisis del comportamiento de la playa observado, ya que en estos ensayos se introdujo una modificación que afecta a la playa, consistente en la ampliación del dique sumergido hasta el morro del dique norte.

En las Figuras 4.11 y 4.12 se muestra el estado final de la playa en el ensayo 9 y en el ensayo 5. En el ensayo 9 se llegó a una altura significativa máxima de 4,30 m, mientras que en el 5 la altura significativa máxima fue de 3,5 m.

Como puede verse, en la zona comprendida entre el arranque del dique sumergido y el dique norte, se puede ver como la prolongación del sumergido da lugar a una menor salida de material.

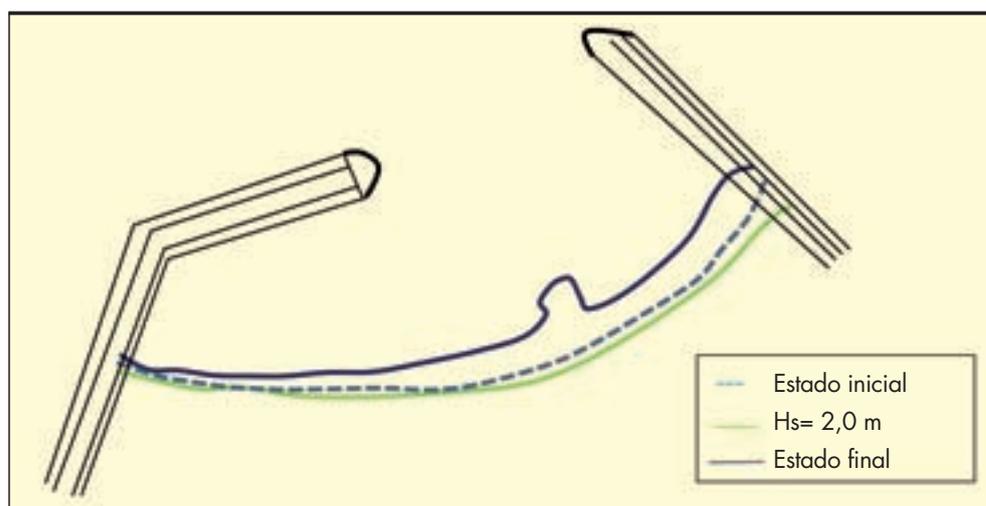


FIGURA 4.9. Evolución de la línea de orilla en bajamar. Ensayo 6. Estado inicial (arriba); $H_s = 2,0$ m (centro); estado final (abajo). ($H_{sm\acute{a}x}$ alcanzada en el ensayo 6 = 2,5 m).

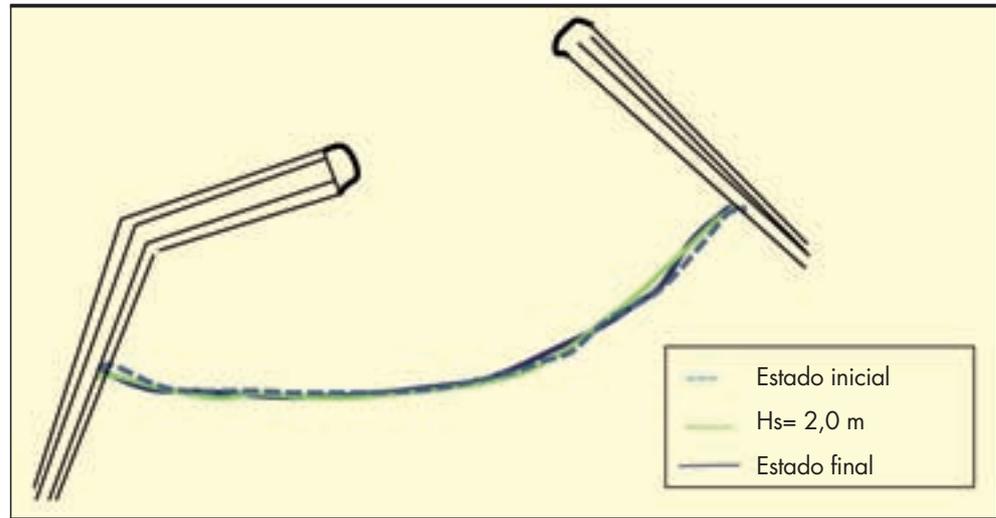


FIGURA 4.10. Evolución de la línea de orilla en pleamar. Ensayo 6. Estado inicial (arriba); $H_s = 2,0$ m (centro); estado final (abajo). ($H_{s\text{máx}}$ alcanzada en el ensayo 6 = $2,5$ m).

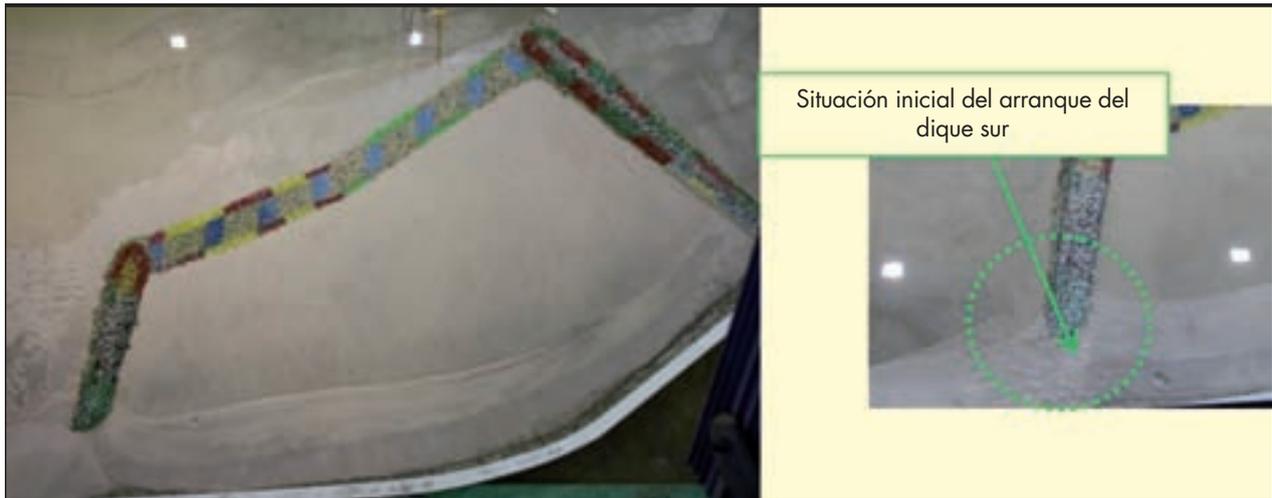


FIGURA 4.11. Ensayo 9. Vista general de la playa. Zonas donde se produce el abandono y la acumulación del material. Estado final. $H_{s\text{máx}} = 4,30$ m (ensayo 9).

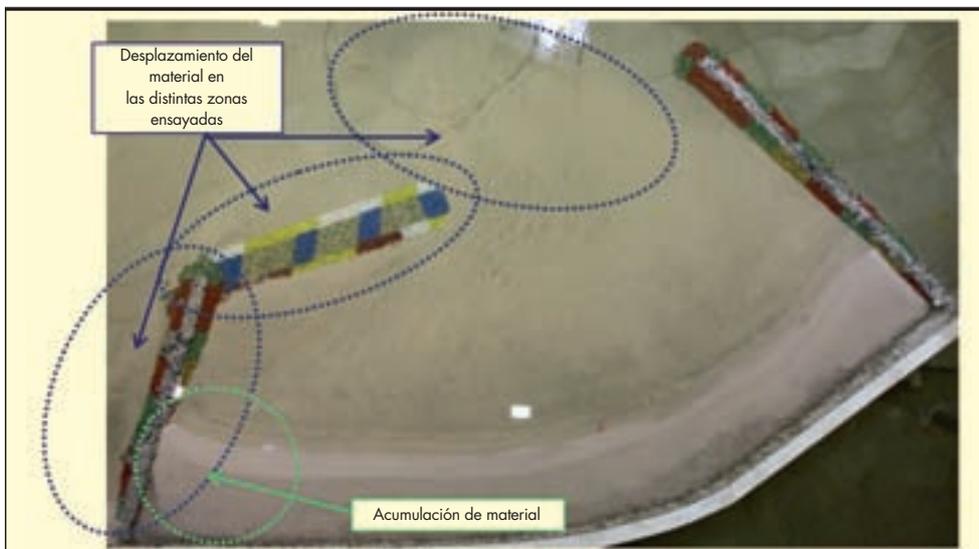


FIGURA 4.12. Ensayo 5. Vista general de la playa. Zonas donde se produce el abandono y la acumulación del material. Estado final. $H_{s\text{máx}} = 3,5$ m.

5. CONCLUSIONES

En los ensayos analizados la playa mantiene una forma aceptable, con una anchura constante aproximadamente constante en toda su longitud, salvo, como es lógico, en los apoyos en los espigones laterales, donde la anchura crece ligeramente. Este crecimiento es algo mayor en el apoyo en el dique sur, aunque en principio no parece excesivo.

La evolución de la línea de orilla en la situación de bajamar es similar en los ensayos 3 y 5, en que se produce un retroceso de la línea de orilla que da lugar al estrechamiento de la playa seca. En el ensayo 6, por el contrario, se produce un avance de ésta. En cuanto a la línea de orilla de pleamar, no se observan movimientos importantes en ninguno de los tres ensayos estudiados.

A la vista de los resultados obtenidos en los ensayos 8 y 9, y teniendo en cuenta los resultados de estabilidad obtenidos, podría ser recomendable alargar el dique sumergido hasta unirlo con el dique norte, con objeto de reducir la salida de material por el espacio comprendido entre ambas estructuras.

6. BIBLIOGRAFÍA

Lechuga Álvaro, Antonio, Dinámica litoral de las Islas Canarias: Gran Canaria, Fuerteventura y Lanzarote. MOPU, Dirección General de Puertos y Costas (sin publicar), 1986.

Lechuga, A. ¿Hay que defender las playas? Una reflexión. Revista de Ingeniería Civil, 113 pp. 131-136. 1999.

Plan indicativo de usos del dominio público litoral: tramo de costa de las islas de Gran Canaria y Tenerife. Dirección General de Puertos y Costas, 1979.

Rodríguez Gil, María Ángeles; Sánchez González, José Francisco, Estudio en modelo físico 3D de las obras de la playa de El Castillo de San Cristóbal (Isla de Gran Canaria). Estudio de estabilidad de los diques de defensa de la playa; Centro de Estudios de Puertos y Costas; informe para Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (sin publicar), 2012.

Sánchez González, José Francisco, Estudio en modelo físico 3D de las obras de rehabilitación de la playa de Punta Larga (Isla de Tenerife) [Recurso electrónico] / [autor, Francisco Sánchez González]; Centro de Estudios de Puertos y Costas; informe técnico para Dirección General de Sostenibilidad de la Costa y del Mar (sin publicar), 2011.

El papel del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en la difusión de los datos hidrológicos

LUIS QUINTAS RIPOLL (*)

RESUMEN El Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX ha participado en la difusión de los datos foronómicos a lo largo de varias décadas de colaboración con la Dirección General del Agua del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Esta colaboración se ha llevado a cabo mediante la realización de sucesivas informatizaciones del proceso de elaboración de los Anuarios de Aforos, elemento clave en la difusión de los datos, haciendo esta difusión más rápida, completa y eficiente.

THE ROLE OF THE HYDROGRAPHIC STUDIES CENTRE (CEDEX) IN THE DISSEMINATION OF HYDROLOGICAL DATA

ABSTRACT *The Hydrographic Studies Centre (CEDEX) has been participating in the spreading of hydrological data by a continuous collaboration in this matter with the General Directorate of Water of the Ministry of Agriculture, Food and Environment. This collaboration was carried out by means of successive computerizations of the Gauging Yearbooks development, the key issue for the data broadcasting, making it more agile, more complete and more efficient.*

Palabras clave: Difusión de datos hidrológicos, Informatización, Anuarios de aforo.

Keywords: Hydrological data dissemination, Computerization, Gauging yearbooks.

1. INTRODUCCIÓN

El 12 de diciembre de 2012 se celebró en la sede de la Confederación Hidrográfica del Júcar una jornada de conmemoración del centenario de la publicación de los Anuarios de Aforo en 1912. Esta jornada, organizada por la propia Confederación Hidrográfica del Júcar, consistió en un merecido homenaje al colectivo encargado de las estaciones de aforo del Júcar, y en una serie de presentaciones relacionadas con la historia, el presente y el futuro de la Red de Aforos. Entre ellas se expuso la presentación que ha dado lugar a este artículo, titulada "El papel del CEDEX en la difusión de los datos de aforos".

2. EL CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS DEL CEDEX Y SU RELACIÓN CON EL MINISTERIO

Si se quiere resumir en una sola palabra cuál ha sido el papel del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en la difusión de los datos de aforos, se debe emplear la palabra CONTINUIDAD. Desde que se publicó por el Centro el primer anuario de aforos, en el año 1962 (Figura 1) la colabora-

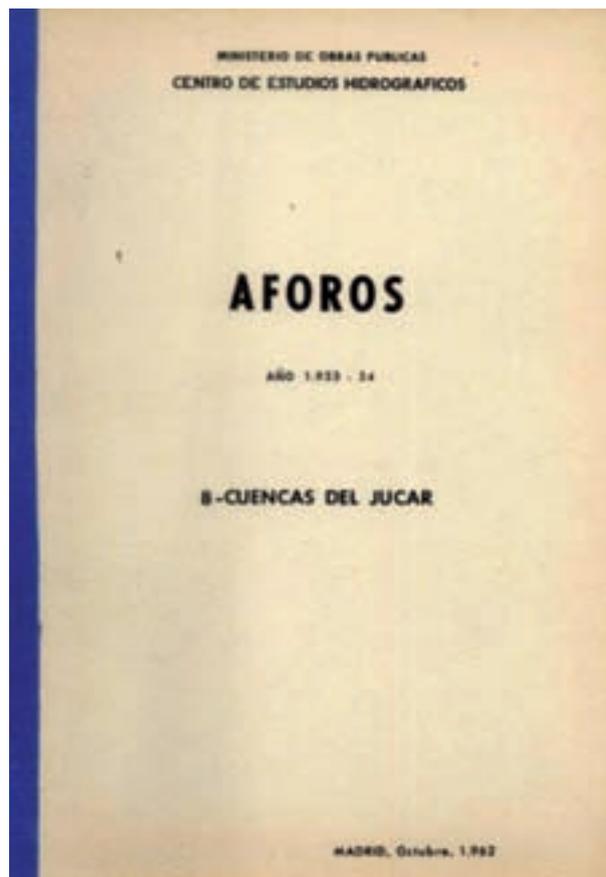


FIGURA 1. Portada del Anuario 1953-54 primero publicado por el CEH en 1962.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puerto. Jefe del Área de Ingeniería de Sistemas del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX.
E-mail: luis.quintas@cedex.es

ción de este Centro con el Ministerio responsable de la difusión de los datos, a pesar de sufrir altibajos, no se ha interrumpido nunca.

Estamos hablando de 50 años (podemos decir que además de celebrarse el centenario de la Red de Aforos estamos celebrando los cincuenta años de esta colaboración, es decir, unas "bodas de oro") en los que la propia estabilidad del Centro de Estudios Hidrográficos frente a los avatares políticos ha hecho posible esta continuidad. Desde 1962, el Centro, incorporado en 1960 al CEDEX, creado en 1957, no ha sufrido ningún cambio institucional, manteniéndose en su papel y en su servicio a los Ministerios, que, estos sí, han sufrido diversas transformaciones debidos a cambios políticos. La Dirección General del Agua, actualmente responsable de los datos de aforo, fue previamente Dirección General de Obras Hidráulicas, y ha pertenecido sucesivamente desde 1962 al Ministerio de Obras Públicas (MOP), al Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo (MOPU), al Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT), al Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente (MOPTMA), al Ministerio de Medio Ambiente (MMA), al Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino (MARM) y finalmente al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA). También las Confederaciones Hidrográficas, generadoras de los datos, han sufrido transformaciones, unas más que otras (algunas ninguna) debido a los procesos de transferencia de competencias originados por el Estado de las Autonomías.

La colaboración del Centro con el Ministerio se ha plasmado en dos líneas de trabajo complementarias: por una parte la recopilación, organización y revisión de los datos, tarea que ha recaído en el Área de Hidrología del Centro, y por otra parte la informatización de los procesos de elaboración, almacenamiento y difusión en soporte informático de los mismos, tarea encomendada al Área de Ingeniería de Sistemas. No se va a exponer aquí el trabajo del Área de Hidrología, tarea de extraordinaria importancia. Si quisiera, desde aquí, hacer un pequeño homenaje a todos aquellos, tanto en este

Centro como en las Comisarías de Aguas de las distintas Confederaciones Hidrográficas y en las Agencias del Agua de las Comunidades Autónomas, que han dedicado tantos años a esta labor, la de la recopilación, revisión y validación de los datos, tarea callada, poco lucida y menos agradecida. Nadie duda de la importancia de los datos, pero los que se dedican a ello, no siempre han sido considerados importantes.

Este artículo se va a centrar pues en la otra línea de trabajo, a la que el autor ha dedicado gran parte de su vida profesional, la labor realizada a lo largo de estos 50 años por el Centro para informatizar los datos y difundirlos de la manera más moderna posible, intentando vencer el mal crónico del retraso en su difusión.

La historia de esta tarea se concreta en una sucesión de informatizaciones de los procesos de elaboración y difusión de los datos, informatizaciones que van dejando su huella visible en los propios Anuarios.

3. LAS PRIMERAS INFORMATIZACIONES DEL ANUARIO: LOS PIONEROS AÑOS 60

Desde los primeros años de trabajo en los anuarios se sintió la necesidad de mecanizar en lo posible su elaboración. Cuando se hace cargo de la edición el Centro, en 1962, se publican los datos del año hidrológico 1953-54, es decir, el retraso es de casi diez años. Para paliar la falta de medios, el Centro efectuó algunas contrataciones a empresas externas de cálculo hacia 1964. En 1966, el Centro efectúa la primera informatización de su historia, adquiriendo un ordenador IBM 1130 (Figura 2). Se trataba de una máquina cuyas prestaciones nos hacen hoy sonreír, pero que en la época correspondían a un aparato de prestaciones avanzadas: 32 K de memoria RAM, programación FORTRAN III sobre tarjeta perforada y discos removibles de 1 Mb. Era una máquina de 3ª generación, con memoria de núcleos magnéticos. Ocupaba unos 50 m² junto con sus máquinas de fichas perforadas, unidades de disco e impresoras de gran formato.



FIGURA 2. Ordenador IBM 1130. (*)

(*) Fuente: <http://computermuseum.informatik.uni-stuttgart.de/>

The image shows two pages from a hydrological data yearbook. The left page is a dense grid of numbers, likely representing daily discharge or water level data for various stations. The right page is a similar grid, but with some text interspersed, possibly representing monthly or annual summaries. The pages are yellowed with age and have a grid-like structure with many columns and rows of data.

FIGURA 3. Numérico (página de datos diarios) de los anuarios de 1964-65 y 1965-66.

Aunque realmente se utilizó para imprimir el llamado estado numérico del anuario (la página de datos diarios, mensuales y anuales de una estación: Figura 3) como si fuera una máquina de escribir, supuso un gran avance por dos razones: en primer lugar porque evitó el envío de las páginas del anuario a imprenta, como venía haciéndose hasta entonces, con el consiguiente trabajo de corrección de erratas y retrasos y en segundo lugar porque permitió almacenar los datos en soporte informático: las fichas perforadas. Posteriormente podrían recuperarse y facilitar su migración a nuevos sistemas.

Tomó así el anuario el aspecto que conservaría hasta hace poco. El primer anuario en producirse con estas máquinas fue el de 1965-66, publicado en 1971.

El IBM1130 estaba muy saturado de trabajo porque tenía que dar servicio a todas las necesidades de cálculo del Centro. Por ello, en 1969 se instaló una nueva máquina en el Área de Hidrología, específicamente para el Departamento de Hidrometría y los trabajos del anuario: un DATA GENERAL NOVA (Figura 4), ordenador de la siguiente generación, considerado el primer miniordenador de la historia por su pequeño tamaño gracias al uso de circuitos impresos, con 8 Kb de RAM, almacenamiento en discos de 2,5 Mb y cinta perforada.

Con esta máquina se pusieron a punto programas en FORTRAN para introducir las curvas de gasto de las estaciones de aforo en ríos y canales, e interpolar los caudales diarios a partir de las alturas de escala diarias, facilitando así la generación de los datos del numérico.



FIGURA 4. Ordenador DATA GENERAL NOVA. (*)

(*) Fuente: http://en.wikipedia.org/wiki/Data_General_Nova



FIGURA 5. Ordenador DATA GENERAL DG20. (*)

4. 1985: LA TERCERA INFORMATIZACIÓN. INFORMATIZACIÓN PARCIAL

A pesar de estos esfuerzos en informatizar los procesos, la carga de trabajo era mucha y no se publicaban los anuarios con la necesaria celeridad. En 1985 se adquirió una nueva máquina, también para Hidrometría: un DATA GENERAL DG20 (Figura 5), con 1 Mb de RAM, discos de 5 Mb y lectora/grabadora de cintas magnéticas de carrete abierto. Era el primer miniordenador de sobremesa. Utilizaba el sistema operativo RDOS y programación FORTRAN. Heredó los programas de las máquinas anteriores y permitió el almacenamiento de los datos en cintas magnéticas y discos duros.

Hay que recordar que en esta época se trataba toda la red oficial de afloros de España en el Centro. No existían las Comunidades Autónomas, y la red constaba de más estaciones en servicio que nunca (unas 800). Se estudiaban entonces, ante las carencias de medios de las Confederaciones Hidrográficas, las curvas de gasto, generándose los caudales diarios. También se estimaba la precipitación en las cuencas y la escurriencia. Los medios informáticos eran extraordinariamente limitados si los comparamos con los actuales. Por ello, los planteamientos eran también limitados, dando lugar a mucha intervención manual en los procesos. El viejo IBM1130 imprimía el numérico entero en una hoja que luego se reducía a tamaño folio. Con el DG20, se utilizaba papel continuo pautado, cuyo tamaño de página obligaba a imprimir en dos partes el numérico: en una hoja el primer semestre y en otra el segundo con los datos anuales. Se reducía todo y se pegaba sobre un folio que luego se fotocopiaba (esto se notaba por las líneas horizontales que aparecían en la página final: Figura 6). También había que efectuar algunas manualidades más: el programa de cálculo de caudales no admitía nullos, por lo que cuando faltaban datos, se introducían números basura que luego se cubrían con un papel en blanco para que no aparecieran en la copia final: es lo que se denominaba “los tapados”. Desgraciadamente los números basura quedaban en los discos, dificultando el trabajo a los que lo heredaron.

Respecto del llamado “resumen” del anuario, la página de cada estación complementaria del “numérico” en la que se resumen los datos anuales y las series interanuales, realmente no se había informatizado nunca. Para informatizarla hacía falta tener almacenados y accesibles todos los datos históricos de las estaciones y esto no se había acometido nunca. Inicialmente, desde 1912 hasta 1964-65 era una página muy elaborada que debía requerir mucho trabajo manual (Figura 7).

FIGURA 6. Página de un numérico del anuario de 1979-80.

Las páginas de los resúmenes de este periodo, desde 1964-65 en adelante, tuvieron el mérito de incluir toda la serie histórica de los caudales medios anuales, máximos medios diarios anuales y máximos instantáneos anuales (estos últimos del máximo interés para los hidrólogos, ya que les son necesarios para la estimación de las leyes de frecuencia de las avenidas). Se incluyó también un diagrama de barras de aportaciones anuales, muy descriptivo de la distribución interanual de los recursos (Figura 8).

Como toda la elaboración era manual, los datos característicos del periodo de existencia de la estación se fueron desactualizando, quedando anclados en 1969-70. El diagrama de barras y los datos anuales se montaban en una gran pieza de papel, apodada por su tamaño “la sábana”, en la que sucesivamente se iban pegando mediante recortes a máquina los datos del año correspondiente sobre la sábana original, reduciéndose posteriormente todo de tamaño y montándose todo a tamaño folio para su edición. Con estas operaciones el anuario perdió legibilidad (Figura 9).

En 1986, por iniciativa de la Dirección General de Obras Hidráulicas de entonces, se acomete el OFIPLAN, un proyecto de informatización del Ministerio que dejó una importante herencia: la informatización de una gran parte de los datos históricos. Con la colaboración del Centro se pasaron todos los datos diarios de las estaciones de aforo en ríos y canales desde el inicio de los anuarios en 1912 hasta 1977-78 a ficheros en formato ASCII y se almacenaron en cintas magnéticas de ca-

(*) Fuente: <http://users.rcn.com/cfriend/museum/machines/DG-DeskGen.html>

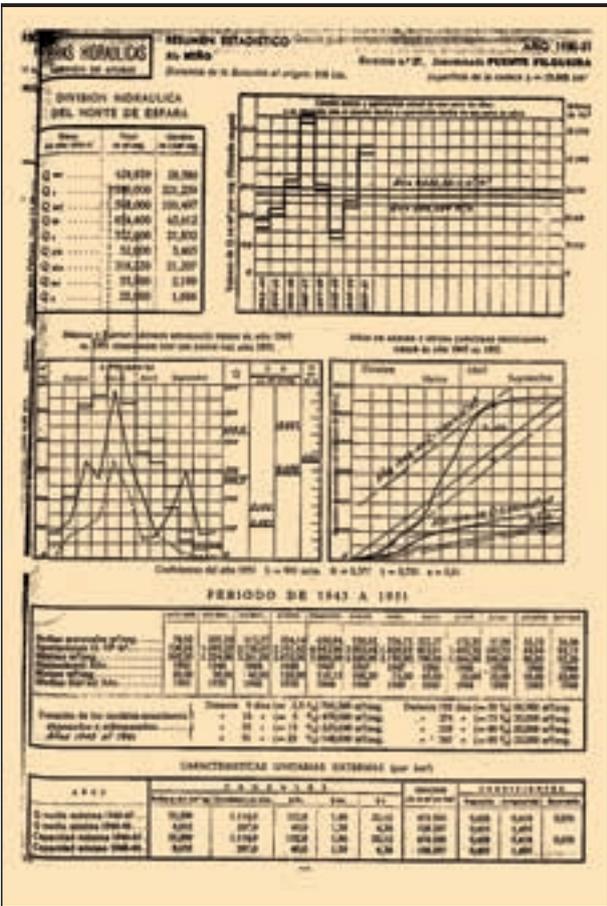


FIGURA 7. Página de un resumen del anuario de 1950-51.

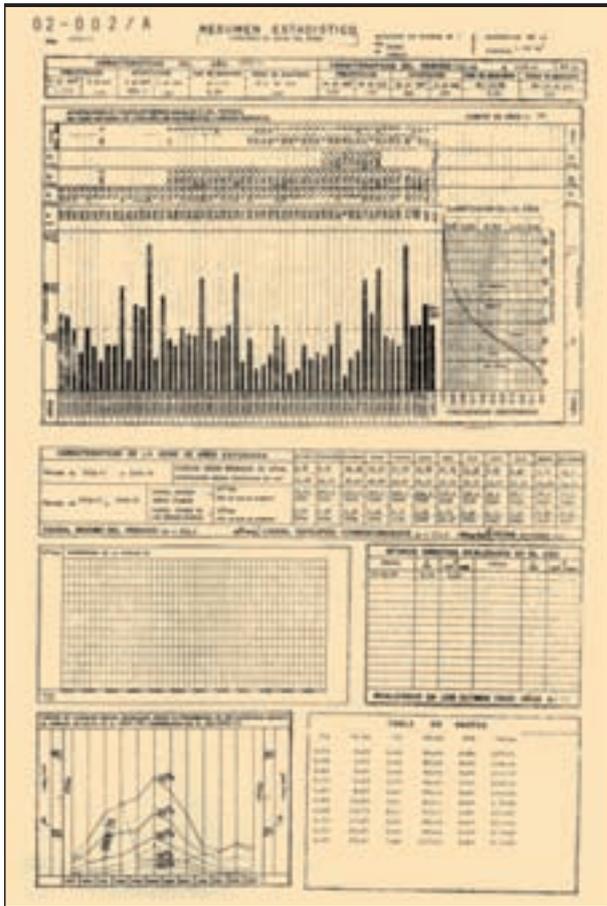


FIGURA 8. Página de un resumen del anuario de 1970-71.

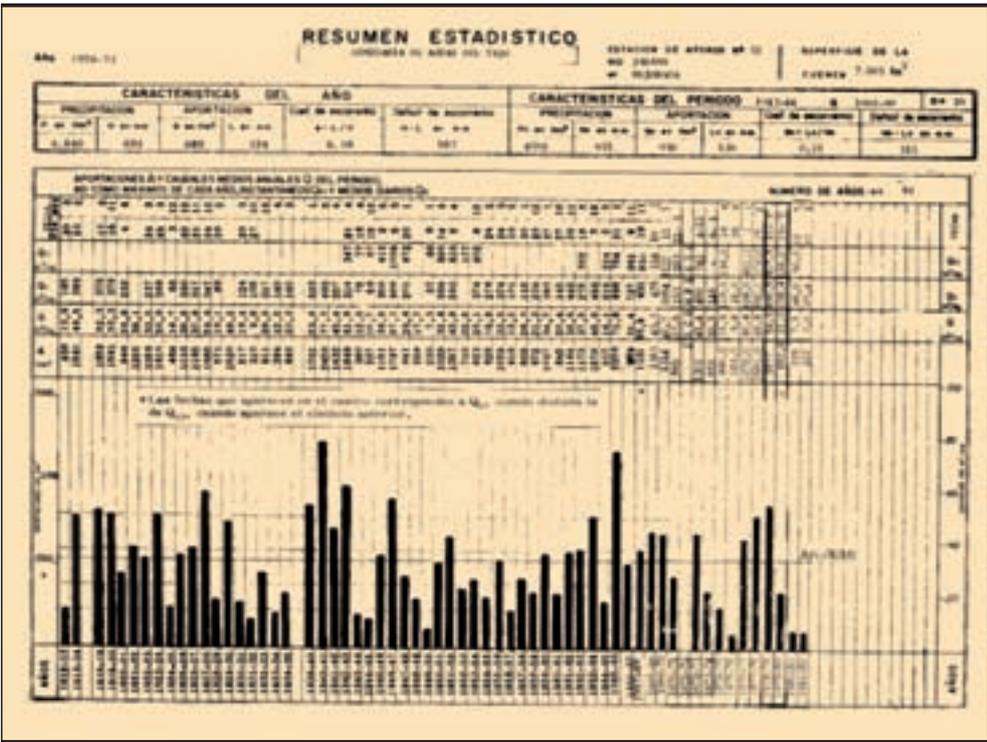


FIGURA 9. Detalle de un resumen del anuario de 1970-71.



FIGURA 10. Colección completa de los anuarios 1912 - 1977-78.

rrete abierto de 100 Mb. Además se microfilmaron las páginas de los anuarios, tecnología muy en boga a la época pero de poca utilidad posterior. Se preparó una colección completa de anuarios convenientemente encuadernados y listos para esta operación (Figura 10). Se aprovechó la ocasión para regularizar la codificación de las estaciones, comenzando los códigos por unos dígitos representativos de la Confederación Hidrográfica a la que pertenecían (1 Norte, 2 Duero, etc.), suprimándose números duplicados señalados con un símbolo “prima” o una letra y asignando a todas un número entero (Figura 11), el denominado “INDROEA”, indicativo de la red oficial de estaciones de aforo, codificación que siguen conservando con algunas modificaciones.

5. 1989: LA INFORMATIZACIÓN INTEGRAL DEL ANUARIO

La cuarta informatización de los datos del anuario se corresponde con la primera informatización general del Centro de Estudios Hidrográficos. En 1987 se sacó a concurso esta informatización, concurso que ganó Hewlett Packard. Se adquirió un miniordenador HP9000/840, máquina multiusuario, 8 Mb de RAM (pronto ampliada a 40), discos de 300 Mb y sistema operativo Unix HPUX (Figura 12).

Se instaló una red local y ordenadores personales conectados con el miniordenador. Se diseñó por fin una base de datos donde almacenar todos los datos (no sólo del anuario, sino to-

ION HIDRAULICA DEL JUCA
SERVICIO DE AFOROS 08-012/A

Estación núm. 3ª. llamada Albetosa, en el río Albetoso.

N. DE ALTURAS DE ESCALA Y CAUDALES CORRESPONDIENTES AL AÑO 1927

FEBRERO		MARZO		ABRIL		MAYO		JUNIO	
Altura de escala por segundo	Caudal	Altura de escala	Caudal						
Metros	Metros cúb.	Metros	Metros cúb.	Metros	Metros cúb.	Metros	Metros cúb.	Metros	Metros cúb.
2,557	2,557	2,557	2,557	2,557	2,557	2,557	2,557	2,557	2,557
0,36	2,604	1	0,36	2,550	1	0,34	2,440	1	0,34
0,36	2,604	2	0,35	2,550	2	0,34	2,440	2	0,33
0,36	2,604	3	0,35	2,550	3	0,34	2,440	3	0,33
0,34	2,440	4	0,35	2,550	4	0,34	2,440	4	0,33
0,34	2,440	5	0,35	2,550	5	0,34	2,440	5	0,33
0,34	2,440	6	0,35	2,550	6	0,34	2,440	6	0,33
0,34	2,440	7	0,35	2,550	7	0,34	2,440	7	0,33
0,34	2,440	8	0,35	2,550	8	0,34	2,440	8	0,33
0,34	2,440	9	0,35	2,550	9	0,34	2,440	9	0,33
0,34	2,440	10	0,35	2,550	10	0,34	2,440	10	0,33

FIGURA 11. Recodificación del indicativo INDROEA de una estación: de 3 prima a 8012.



FIGURA 12. Miniordenador HP9000/840. (*)

migraciones sigue vigente hoy en día (de ALLBASE se pasó a INFORMIX (Figura 13) y finalmente a PostgreSQL).

Para poblar la base de datos y poder informatizar los anuarios, tanto los numéricos como los resúmenes, había que recuperar toda la información almacenada, como se ha relatado, en diversos soportes informáticos. El periodo 1912 – 1977-78 estaba en las cintas magnéticas de OFIPLAN, que mediante programación se leyeron y pasaron a un formato apto para su carga en la base de datos HIDRO. No fue un ejercicio sencillo, ya que por alguna razón, los nulos y los ceros se presentaban todos como ceros, por lo que hubo que efectuar un repaso general año a año. Por otra parte, los caudales de más de tres dígitos (todos se almacenaron como enteros de seis cifras, incluyendo los tres decimales) estaban truncados, faltando el dígito de los miles. También necesitó un repaso minucioso. Los años comprendidos entre 1932 y 1941, los llamados “años de la guerra”, que estaban recogidos en una publicación del Centro, se introdujeron manualmente en la base de datos (eran datos sólo mensuales, proporcionados por la buena voluntad de los escaletos y los Servicios de Hidrometría de las Confederaciones). Los datos entre 1978-79 y 1983-84, almacenados en cintas magnéticas y discos duros en formato RDOS de DATA GENERAL, fueron procesados en el DG20 antes de su retiro, para producir ficheros ASCII legibles en el sistema operativo Unix de la nueva máquina. Hubo que revisar los anuarios año a año aquí también debido al uso de los “tapados” que generaron valores indeseables en lugar de los nulos. También ocurrió algo más complicado: en el DG20 sólo se habían almacenado los datos de las alturas de escala y las curvas de gasto, según el criterio, cierto, de que los datos de caudal son datos derivados de estos, no brutos. De manera que para almacenar los datos de caudal había que ejecutar los programas de interpolación de caudales a partir de las alturas y la curva de gasto. Sin embargo, las curvas de gasto se reutilizaron varias veces, quedando almacenada sólo la última. Al generar los caudales, los resultados no coincidían con los datos publicados. De nuevo hubo que revisar año por año y corregir los errores.

dos los necesarios para los estudios emprendidos por el Centro). Se creó la base de datos ‘HIDRO’, con el sistema de gestión de base de datos propietario de HP, el HP/ALLBASE, base de datos relacional SQL, arquitectura que tras diversas

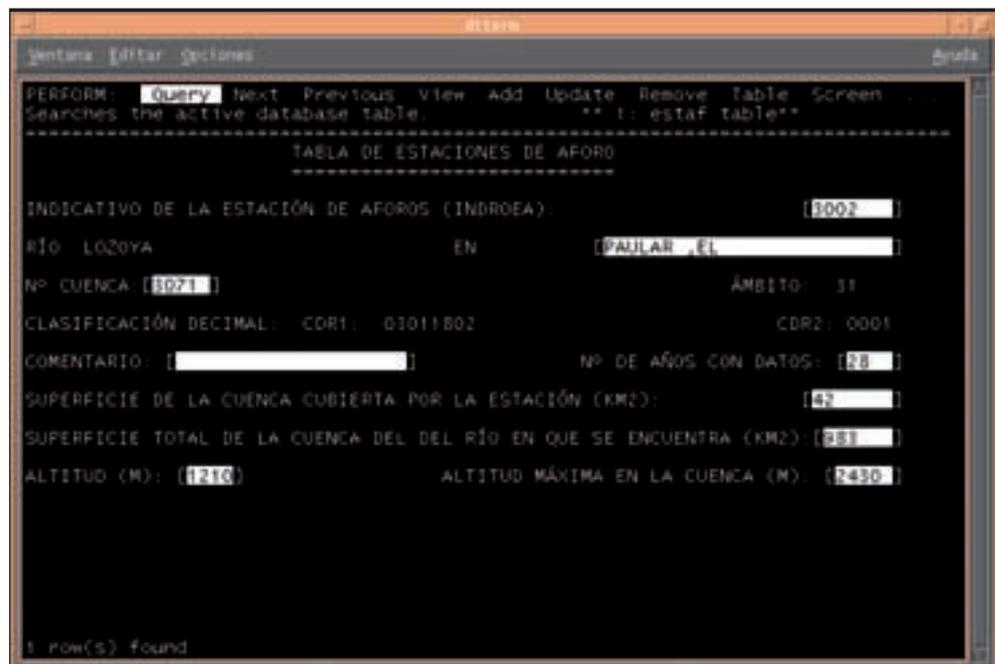


FIGURA 13. Menú de la base de datos HIDRO sobre INFORMIX.

(*) Fuente: http://computermuseum.informatik.uni-stuttgart.de/dev/hp9000_840/

FIGURA 14. Numérico del anuario informatizado.

Finalmente, gran parte de los datos históricos sólo existían en papel. Todos los datos informatizados por un modo u otro eran de las estaciones de aforo en ríos y canales, pero no había nada almacenado de los embalses, cuyos datos se empezaron a publicar en 1958-59. Tampoco estaban almacenados los datos de las estaciones de aforo en canales llamadas “de sólo caudal” porque no se publican alturas. También estaban en papel los aforos directos, unos 65.000, y los “años de la guerra”, como ya

se ha mencionado. Entre 1990 y 1995, además de utilizar recursos propios, el Centro contrató sucesivos equipos de grabadores dentro de campañas de contratos para parados del INEM, con los que se fue grabando toda la información para su carga en la base de datos. Paralelamente se fueron desarrollando los programas de carga y explotación en el lenguaje de la época, lenguaje C y scripts de Unix. De esta manera se generó un numérico más legible (Figura 14), que siguió presentando el mismo aspecto pero más limpio (de hecho se siguió utilizando el viejo programa en FORTRAN III), y sobre todo se informatizó el resumen (Figura 15), que además se extendió a los embalses que nunca lo habían tenido. También se pudo por fin satisfacer el deseo de los hidrólogos que venían a pedir datos, a quienes los anuarios no contentaron nunca porque se les ofrecía un año de todas las estaciones, y en papel, y no todos los años de una estación, y en soporte informático, que es lo útil para un estudio hidrológico. Por fin se les podía entregar fácilmente los datos en un fichero ASCII (Figura 16).

6. 2007: LA MODERNIZACIÓN DEL ANUARIO

Durante los años 90 y 2000, se producen diversos altibajos en la difusión de los datos, no por dificultades técnicas, sino por los propios avatares de las administraciones. Es la época en la que se van transfiriendo las competencias del agua, quedando fuera de la responsabilidad directa del Ministerio sucesivamente las cuencas internas de Cataluña, las cuencas internas de Galicia Costa, las cuencas internas del País Vasco y finalmente las cuencas internas de Andalucía. Además aparecen dificultades también para el establecimiento de los Convenios entre el CEDEX y el Ministerio. Por todo ello, el anuario vuelve a publicarse con retraso y sólo parcialmente. Por fin en 2007 se firma una Encomienda de Gestión CEDEX-Ministerio amplia, por cuatro años, en la que se contempla, entre otros muchos trabajos, la modernización del anuario. En este periodo se habían producido muchos cambios, siendo necesaria la transformación de los anuarios en algo más acorde con los tiempos. No parecía conveniente mantener una publicación anual consistente en unos voluminosos tomos en papel, cuando la informática permitía la difusión en soportes mucho más capaces y modernos. Se decidió imprimir en papel (también se entregaba en soporte informático en formato pdf) sólo el resumen de las estaciones (Figura

FIGURA 15. Resumen del anuario informatizado.

Formato de salida: ASCII (1000 caracteres por línea máxima de datos). Ordenados en orden.

Estación	Tipo	Año	Jan	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media
00000	ARQ	1980-01-01	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

FIGURA 16. Fichero ASCII de entrega de datos mensuales.

CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA NORTE
CUENCAS DEL CANTÁBRICO

IDENTIFICACIÓN

ESTADO: ALTO NÚMERO: 1000
 Cód. en 1070: 000 SAN
 UTM X NORO Y: 470107 4650 30 4274 (m) 40
 RD: CARES
 CUENCA RECEPTORA: RÍO: RÍO
 SISTEMA DE EXPLOTACIÓN: OTRO
 T. MUNICIPAL: PERABELLERA ALTA
 PROVINCIA: ASTURIAS
 RÍO: T. NOMBRE: CARRERA-CARRALES (RD)

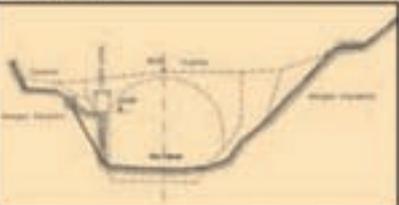
TIPOLOGÍA

TIPO DE ESTACIÓN: CRUCE NATURAL
 RÉGIMEN DE CAUDALES: ALTERADO
 LONGITUD (m): ANCHO (m)
 ESCALA: SI EXTENSION
 Nº ARQUITECTO: 0 PARALELA: NO
 VERTICIDAD: NO
 CUBIERTA: SI DE FABRICA
 SACA: NO SACA: NO

FICHA ESTACIÓN DE AFOROS EN RÍO
1076 WEB



SECCIÓN TIPO



Estación de Aforo: 1276 Río Cares en Mier



Caudales máximos en 24 h		Qp	Fecha Qp	mediana de Qp	Qp1	Fecha Qp1	mediana de Qp1
-44- 2005-06		146.00	20/12/2005	100.0	107.5	7/11/2005	106.4
-44- 2005-06		100.7	7/10/2005	100.0	100.7	7/10/2005	100.0

Aportaciones mensuales (mm³)		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
Máximo		4.6	8.5	23.5	97.0	115.4	141.1	174.4	222.0	7.9
Mínimo		100.0	106.0	205.0	170.2	100.0	120.8	112.8	171.8	100.0
Promedio Anual		47.4	48.2	76.2	122.9	70.9	48.3	95.6	94.8	52.8
-44- 2005-06		48.3	75.7	75.4	76.3	41.1	102.3	48.7	16.4	6.0



FIGURA 17. Ficha resumen del anuario de 2005-06.

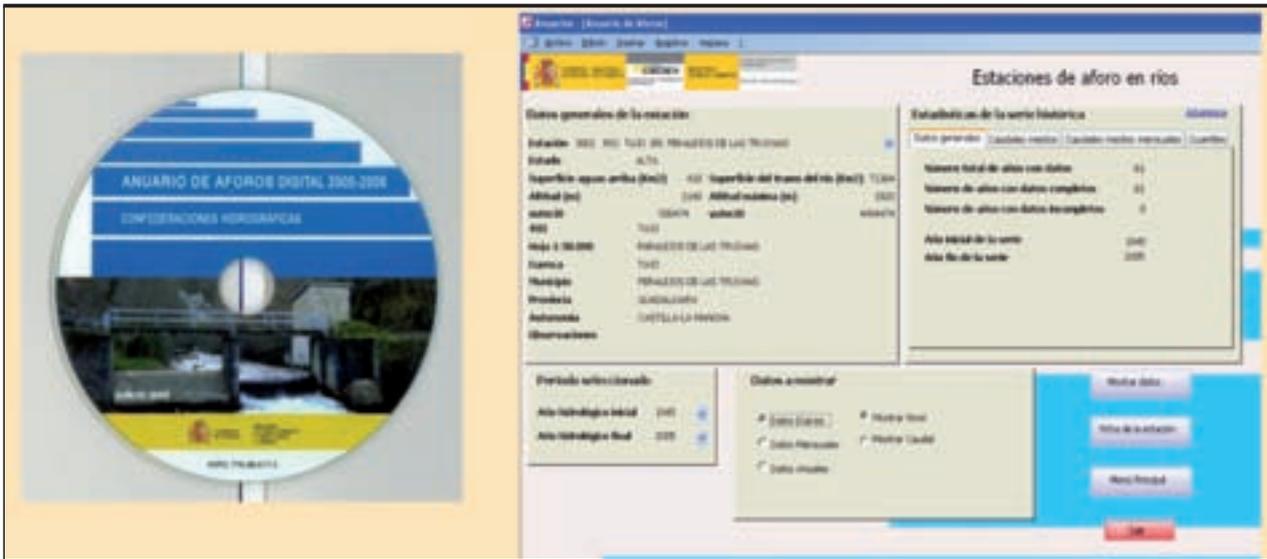


FIGURA 18. DVD y base de datos del anuario de 2005-06.

17), con contenido muy gráfico, y centrar el grueso de la entrega en una base de datos en DVD, que contuviera, no sólo los datos del año, sino la totalidad de los datos desde el origen de las medidas. Además se pondrían los datos en Internet para su difusión directa. Las fichas resumen se obtienen de la base de datos HIDRO, mediante sencillas herramientas de ofimática (Microsoft Excel y Microsoft Access conectados directamente a HIDRO) y se crea una base de datos MS Access distribuible en el DVD con una aplicación para la consulta de los datos. Se difunde así en 2008 el anuario 2005-06 (Figura 18), tras un gran esfuerzo de recuperación de numerosos años de datos almacenados, terminando con el retraso crónico de la publicación.

Paralelamente se publican los datos por Internet mediante un portal de acceso en la página Web del Centro (Figura 19) y mediante una conexión al Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente integrando los datos en el SIA, Sistema de Información del Agua (Figura 20).

A la vez, se colabora con los servicios informáticos del MAGRAMA para la implementación de los datos en su visor cartográfico denominado Sistema de Información del Anuario de Aforos incluido en su página Web (Figura 21).

Se modernizan también los servicios informáticos del Centro, donde se adquiere un nuevo servidor, un HP Proliant DL580 con dos procesadores de cuatro núcleos, 32 Gb de RAM y 8 discos de 300 Gb (Figura 22). Se migra el gestor de base de datos al nuevo servidor y a PostgreSQL, sistema de gestión de base de datos de dominio público, sobre sistema operativo Linux Fedora 13, también público, para reducir costes. La base de datos se gestiona con PgAdminIII (Figura 23) sin ningún coste, aunque se conservan los programas de explotación en C a bajo nivel, tras migrarlos al nuevo sistema.

En el penúltimo anuario publicado, el de 2008-09, se incluyen los datos de Galicia Costa facilitados por la Xunta de Galicia y se incrusta un servidor de mapas en la base de datos del DVD para facilitar las búsquedas mediante una interfaz

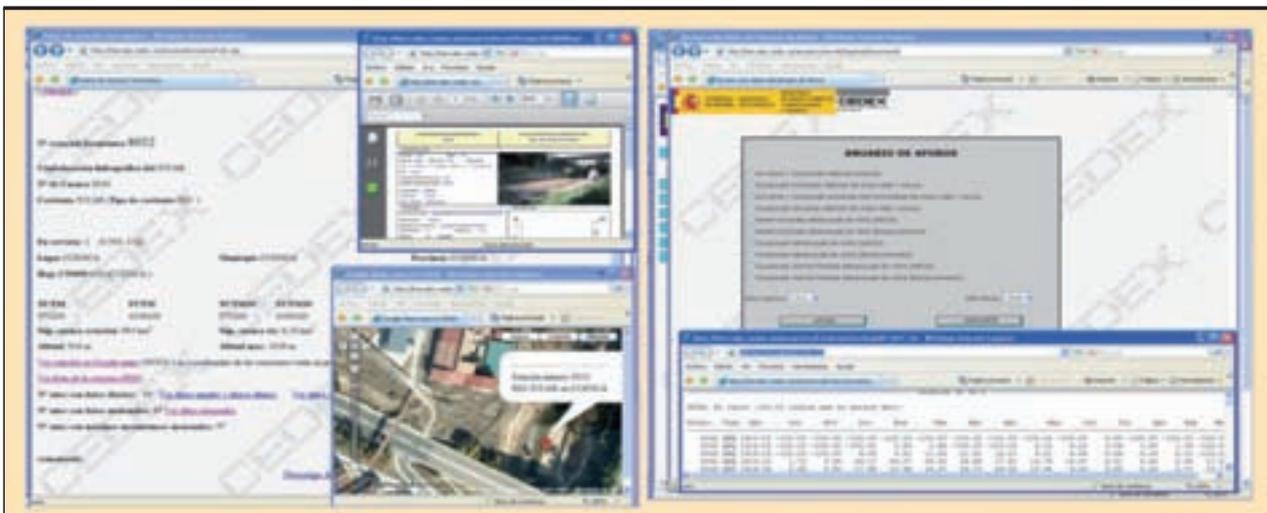


FIGURA 19. Acceso por Internet a los datos del Anuario mediante la Web del Centro de Estudios Hidrográficos.

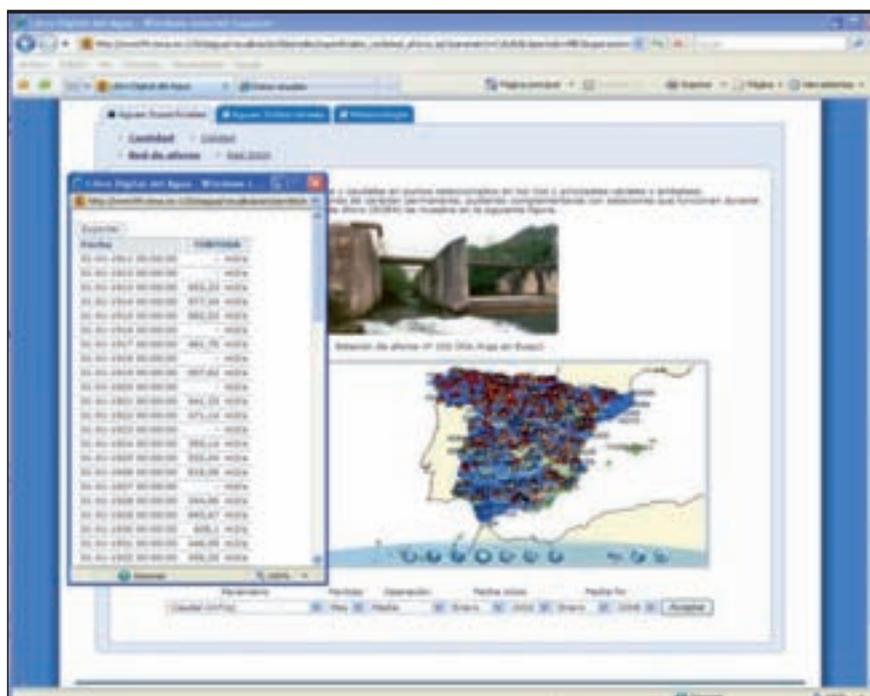


FIGURA 20. Acceso por el SIA del MAGRAMA a los datos del Anuario.

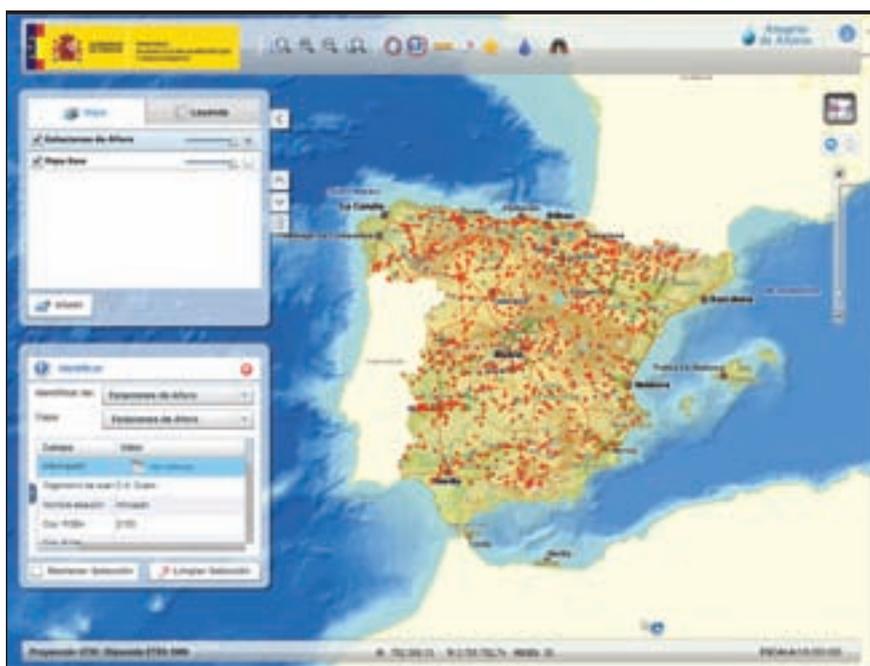


FIGURA 21. Visor cartográfico del Anuario en la Web del MAGRAMA.



FIGURA 22. Servidor actual de la base de datos HP DL580.

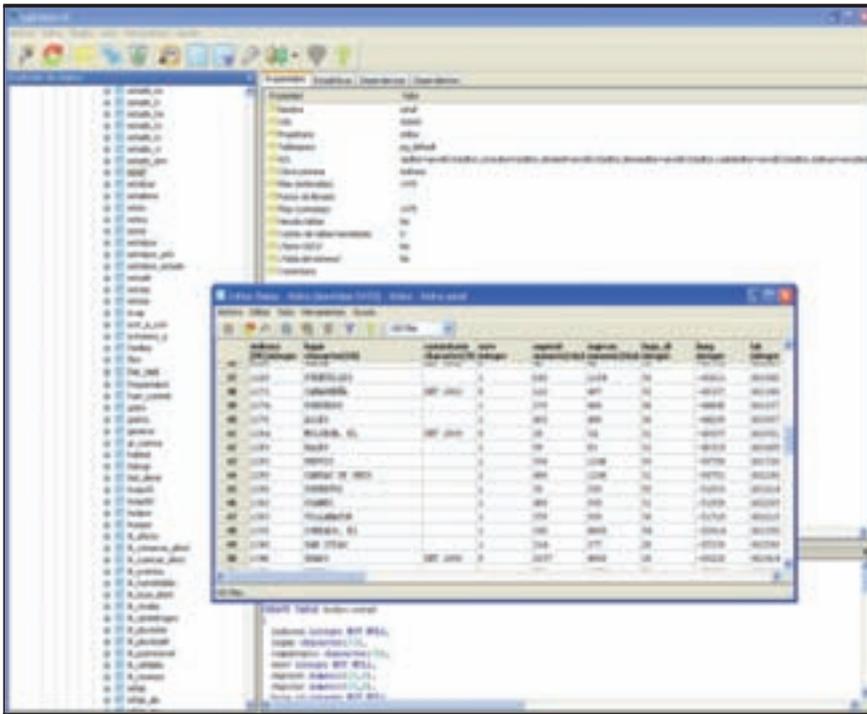


FIGURA 23. Gestión de la base de datos HIDRO mediante software libre PgAdminIII.

geográfica (Figura 24). Además, atendiendo los ruegos de muchos usuarios, se incorpora la posibilidad de consultar los datos con el formato del numérico clásico (Figura 25).

Con el último anuario, 2009-10, se decidió suprimir definitivamente la publicación en papel y entregar los resúmenes en soporte informático (formato pdf) junto con la base de datos, siguiendo así la tendencia general de ahorro de papel.

Con todas estas actuaciones se finalizó la quinta informatización del anuario, agilizándose la publicación radicalmente.

7. 2013: PRIMER PASO HACIA EL FUTURO: LA INTERCONEXIÓN DE LAS BASES DE DATOS HIDROLÓGICAS

Actualmente está en curso la sexta informatización. Se trata de un proyecto muy ambicioso, llevado desde la Subdirección de Planificación y Uso Sostenible del Agua de la Dirección Gene-

ral del Agua del MAGRAMA, con el fin de agilizar lo más posible la elaboración de los anuarios y poder disponer de toda la información necesaria en cuanto se produce. Para ello, se van a instalar herramientas informáticas de tratamiento de los datos comunes en todas las Confederaciones Hidrográficas, conectadas a las bases de datos hidrológicas que disponen, y se volcarán los datos finales en una base de datos central en el Ministerio. El Centro dispondrá de una conexión para continuar con las labores de tratamiento de la información. De esta manera se facilitará el flujo de datos entre los proveedores de los mismos, las Confederaciones Hidrográficas, el CEDEX y la Dirección General del Agua y se agilizará en lo posible la publicación de los datos. Para este proyecto, que requiere unas aplicaciones informáticas muy avanzadas y específicas para la hidrometría, se ha optado por una aplicación bajo licencia, WISKI, de la empresa Kisters, muy implantada en Europa (Figura 26).



FIGURA 24. Mejoras en el anuario de 2008-09: visor cartográfico.

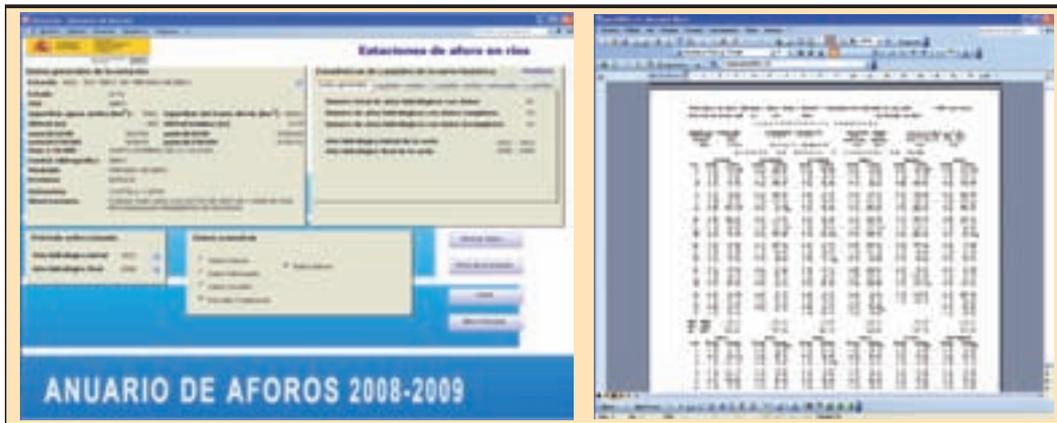


FIGURA 25. Mejoras en el anuario de 2008-09: numérico con formato clásico.

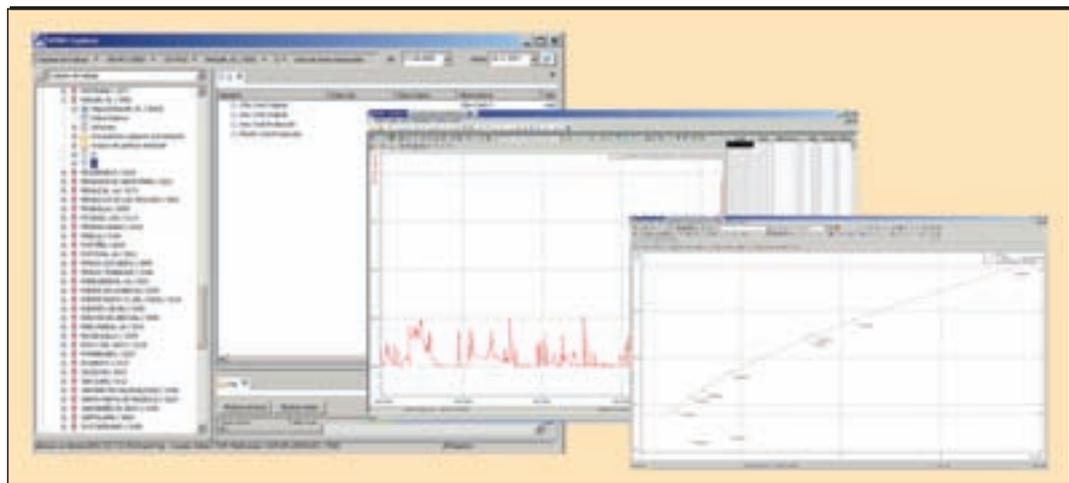


FIGURA 26. Aplicación de tratamiento de datos hidrológicos WISKI.

8. CONCLUSIONES

El papel del Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX en la difusión de los datos foronómicos ha sido central durante los últimos cincuenta años. La ROEA no es una red que genere datos brutos que simplemente han de almacenarse y luego publicarse. Necesitan elaboración y conocimiento. Está compuesta

de un elevado número de estaciones de medida y ha supuesto desde su creación un gran esfuerzo de tratamiento de datos para los que se ha recurrido a la informática. Se han efectuado seis informatizaciones de los procesos que han permitido modernizar el anuario (Figura 27), y hacer cada vez más fácil el acceso a los datos, acelerando su publicación y disponibilidad.



FIGURA 27. Evolución del Anuario de Aforos.

EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 223
Año de edición: 2012
P.V.P.: 25€

Se entiende por hormigón reciclado el hormigón fabricado con árido reciclado o una mezcla de árido reciclado y árido natural. Con carácter general, la utilización de árido reciclado empeora las propiedades del hormigón, si bien existen grandes variaciones en los resultados. Algunos estudios han reflejado que la mayoría de las propiedades se ven perjudicadas por el empleo de árido reciclado, mientras que otros estudios determinan que solamente aquellas propiedades relativas a la deformabilidad del hormigón sufren variaciones importantes (como el módulo de elasticidad o la retracción del hormigón). Por otro lado, diversos autores han encontrado incluso ligeras mejoras en algunas propiedades como la resistencia a compresión y a tracción del hormigón reciclado. En la monografía se tiene en consideración aspectos como la heterogeneidad que presentan los áridos reciclados, la calidad del hormigón de origen, porcentajes de árido grueso reciclado, etc. Uno de los objetivos de la monografía consiste en establecer el porcentaje máximo admisible del árido grueso reciclado en hormigón estructural, estudiando la influencia que tiene en el hormigón la incorporación de distintos porcentajes de árido reciclado. Además, se definen las aplicaciones en las que puede utilizarse el hormigón reciclado estructural. Por último, se han establecido unas recomendaciones sobre la fabricación del hormigón reciclado, y las correcciones necesarias que se deberán aplicar tanto a los métodos de dosificación actuales como a las fórmulas establecidas para estimar las propiedades de los hormigones convencionales.



Nº de páginas: 147
Año de edición: 2012
P.V.P.: 25€

En este trabajo se estudia el diseño y comportamiento de los principales sistemas de vía en placa, tanto de losa continua armada como de losas discontinuas pretensadas, y se compara con la vía clásica sobre balasto. Se caracterizan en primer lugar las acciones dinámicas transmitidas por el tráfico ferroviario, se estudia el deterioro por fatiga de la losa y se analizan los requisitos geotécnicos de la plataforma y terraplenes. Se estudian asimismo los estados límite de servicio que se deben requerir a los viaductos con vía

en placa, considerando la interacción longitudinal entre la vía y la estructura. Se investiga la interacción entre los vehículos y la vía, incluyendo modelos tridimensionales detallados de la dinámica en recta y en curva, así como los efectos sobre el desgaste ondulatorio. Se proponen modelos numéricos innovadores para la transmisión de vibraciones a través del terreno y a las estructuras próximas, tanto para la vía en placa como sobre balasto. Se realiza un estudio económico de costes por ciclo de vida comparando ambos tipos de vía, considerando los costes de inversión, mantenimiento y los modelos de costes, cuya aplicación permite alcanzar unos resultados generales comparativos y estimar la influencia de los distintos parámetros. Por último, como resumen se desarrolla una guía de concepción que sintetiza las recomendaciones principales de este estudio. El trabajo se desarrolló en el marco de un proyecto de investigación desarrollado entre los años 2007 y 2009, financiado por el Ministerio de Fomento de España a través del CEDEX ligado al plan estratégico de infraestructuras y transporte (PEIT), según convocatoria publicada en BOE de 24 jul 2006 y concesión de 5 dic 2006, referencia PT-2006-024-19CCPM.



Nº de páginas: 300
Año de edición: 2012
P.V.P.: 25€

Dentro del marco del proyecto de investigación MODETRA "Metodología para el diseño e implantación de sistemas de moderación de tráfico", subvencionado por el CEDEX, se ha desarrollado esta Guía para la elaboración de planes urbanos de moderación de tráfico. El objetivo de la Guía es servir de referencia a los técnicos municipales y los técnicos de las administraciones de carreteras con travesías a su cargo para desarrollar estudios y proyectos de moderación de tráfico, en aras de mejorar la operación del

tráfico en vías urbanas y travesías, fomentando la seguridad vial de todos los usuarios de las vías y la calidad ambiental. Para ello, se ha desarrollado una metodología sencilla, clara y sistemática para la evaluación, el diseño y la instalación de los sistemas de moderación de tráfico, y el análisis de la operación del tráfico y la seguridad vial resultante, en vías urbanas y travesías, con y sin elementos de moderación de tráfico en el momento de abordar el estudio correspondiente. En la Guía se definen las directrices para el diagnóstico de la operación del tráfico en cada vía del ámbito urbano afectado, basado en el perfil de velocidad de operación a lo largo de la misma. Asimismo, se presentan criterios técnicos de implantación de elementos moderadores de tráfico, que no describen únicamente los elementos individualmente sino que también incluyen los sistemas de moderación de tráfico, es decir, agrupaciones eficientes de los mismos. Finalmente, en los apéndices se incluye: un glosario de términos con definiciones de las medidas de moderación de tráfico y terminología equivalente en español e inglés; tablas resumen de los criterios técnicos; la clasificación de las m; y los parámetros influyentes en la comodidad y en la seguridad de cada moderador de tráfico.

Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

Seguimiento del uso de las estructuras transversales de la autovía A-40 por los vertebrados terrestres, antes y durante la construcción de la línea de alta velocidad Madrid-Levante¹

ESTHER JUÁREZ SANZ (*), CRISTINA MATA ESTACIO (**), MANUEL G. SÁNCHEZ-COLOMER (***), JUAN E. MALO ARRÁZOLA (****), JESÚS HERRANZ BARRERA (*****) y FRANCISCO SUÁREZ CARDONA (*****)

RESUMEN El notable incremento que ha experimentado en las últimas décadas la red viaria española, ha llevado a que algunas de las nuevas infraestructuras se construyan de forma más o menos paralela a otras ya existentes, constituyendo los denominados corredores de infraestructuras. Ante esta situación, y en un contexto en el cual cada vez cobra mayor importancia la necesidad de minimizar el impacto ambiental de estos proyectos, se plantean nuevos interrogantes destinados a entender cómo afectan las nuevas construcciones sobre la fauna del entorno o si la presencia de una nueva vía podría condicionar la efectividad de las medidas correctoras implementadas en la infraestructura existente.

Con el objetivo de tratar de resolver parte de estas incógnitas se planteó el presente estudio. Para ello, se seleccionó un tramo de la autovía A-40 en Cuenca, en cuyo entorno estaba planificada la construcción de la línea ferroviaria de alta velocidad (LAV) Madrid-Levante. A lo largo de cuatro campañas, completando un ciclo estacional anual, se realizó el seguimiento de la utilización por la fauna de un total de 30 estructuras transversales a la autovía A-40. Se emplearon dos métodos de control: el registro de huellas y un sistema fotográfico automático. El estudio se inició simultáneamente a la fase de licitación de la LAV y finalizó en la fase de obras, lo cual permitió comparar los resultados previos a las obras con los obtenidos durante dicha fase.

Los resultados no mostraron un efecto significativo de las obras de la LAV sobre las especies que utilizaban las estructuras de la autovía A-40. Sin embargo, los factores de diseño como el tipo de paso y la localización de los mismos fueron los más determinantes.

MONITORING OF THE USE OF CROSSING STRUCTURES BY LAND VERTEBRATES ON THE A-40 HIGHWAY, BEFORE AND DURING THE CONSTRUCTION OF THE HIGH-SPEED RAILWAY LINE MADRID-LEVANTE

ABSTRACT *The important increment in the number of constructions in the Spanish transportation network has resulted in the creation of new infrastructures running more or less parallel to the existing ones, leading to what is known as infrastructure corridors. In view of this situation, and in a context where the need to minimize the environmental consequences of these constructions is more and more important, new questions appear in order to get to understand how new constructions may affect wildlife in their natural environment and whether the existence of a new infrastructure could influence the effectiveness of the corrective measures already implemented in the existing infrastructure.*

This study was conceived with the goal of finding solutions to some of these problems. To do so, we focused on a stretch of the A-40 highway in Cuenca, where the construction of the high-speed railway line (LAV in Spanish) Madrid-Levante (Cuenca) was planned. Throughout four campaigns –completing an annual seasonal cycle– the monitoring of wildlife use of 30 crossing structures the A-40 highway was carried out. Two control methods were used: track data and an automatic photography system. The study was started while the LAV was at the tender stage and it concluded with the works still being performed. This fact allowed making a comparison between the results prior to the beginning of the works and the results obtained during such works.

The results did not show that the works on the LAV had a significant impact on the species using the structures of the A-40 highway. Nevertheless, design factors such as the type of passage and its location were the most determining.

Palabras clave: Fragmentación del hábitat, Autovía, Línea de tren de alta velocidad, Pasos de fauna, Ecología de carreteras, Corredor de infraestructuras

Keywords: Habitat fragmentation, Highway, High speed railway, Wildlife passages, Road ecology, Transport corridor.

(*) Licenciada en Biología. Área de Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX – Ministerio de Fomento. E-mail: esther.juarez@cedex.es

(**) Doctora en Ciencias Biológicas - Profesora Asociada. Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. E-mail: cristina.mata@uam.es

(***) Doctor en Ciencias Biológicas - Jefe de Área. Área de Ingeniería Ambiental. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del CEDEX – Ministerio de Fomento. E-mail: manuel.colomer@cedex.es

(****) Doctor en Ciencias Biológicas - Doctor en Ciencias Biológicas - Profesor Titular. Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. E-mail: je.malo@uam.es

(*****) Doctor en Ciencias Biológicas - Profesor Contratado Doctor. Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid. E-mail: jesus.herranz@uam.es

(***** Doctor en Ciencias Biológicas. Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid.

(1) Este artículo está dedicado a la memoria de Francisco Suárez.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas asociados a la construcción de nuevas infraestructuras es el efecto barrera sobre los vertebrados terrestres, especialmente asociado a las vías de alta capacidad valladas para evitar el acceso de los animales a la infraestructura. Tanto en las autovías modernas como en las líneas de alta velocidad (LAV) se realizan actividades de conservación para el mantenimiento o reposición del vallado deteriorado con lo que esta barrera se mantiene de manera casi constante a lo largo del tiempo. Esta fragmentación del hábitat y su posible efecto barrera posterior, puede contribuir al declive o extinción de poblaciones de fauna a escala local, por ello la construcción de nuevas infraestructuras requiere estudios para detectar los cambios en las poblaciones y minimizar el impacto sobre el ecosistema (Lodé, 2000). Además, son muy escasos los estudios que analizan los efectos sinérgicos o acumulativos que pudieran producirse con otras infraestructuras planificadas en el entorno (Krausman y Harris, 2011).

Por ello, este estudio se centra en el seguimiento de una infraestructura lineal teniendo en cuenta la construcción de una nueva, planificada en el Plan Estratégico de Infraestructuras de Transporte 2005-2020 (PEIT) (Ministerio de Fomento, 2005).

Los principales objetivos de esta investigación son analizar los patrones generales de uso de las estructuras transversales de la autovía A-40, por parte de las diferentes especies de vertebrados terrestres en la zona de estudio, tal y como se ha realizado en diferentes estudios anteriores (Yanes *et al.*, 1995; Rodríguez *et al.*, 1996; Mata *et al.*, 2005). Y por otro lado, si dicha utilización se ve afectada por la construcción en paralelo de la LAV Madrid-Levante, ya que esta aproximación permite evaluar cómo afecta la construcción de otra infraestructura en la efectividad de unas medidas correctoras implementadas en una infraestructura previa.

2. METODOLOGÍA

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica dentro de la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha, en la provincia de Cuenca, en una región donde confluyen tres infraestructuras lineales; la

carretera nacional N-400, la autovía A-40 y la LAV Madrid-Levante.

Presenta un uso forestal arbolado y ralo, con zonas de monte público y privado en los altos de Cabrejas, y un uso parcheado de matorral, pastizal o cultivo agrícola cercanos a los cauces principales de los ríos Chillarón y Cigüela. La vegetación es de tipo subesclerófila. En las zonas arboladas predominan el pino salgareño (*Pinus nigra* subsp. *salzmannii*) y el pino carrasco (*Pinus halepensis*) con la encina (*Quercus ilex*) y el quejigo (*Quercus faginea*) (Banco de Datos de la Naturaleza, 2006). La distribución de las especies es heterogénea, ya que presenta manchas de vegetación de coníferas puras y zonas en mosaico de frondosas y coníferas. Además, el pino salgareño es sustituido por el pino resinero (*Pinus pinaster*) en terrenos silíceos.

El objetivo central del estudio son los vertebrados terrestres no voladores, aunque también se han detectado especies voladoras como aves y murciélagos (Figura 1). Se ha elaborado un listado con la fauna potencial del área de estudio teniendo en cuenta los atlas de distribución existentes (Blanco, 1998; Barbadillo *et al.*, 1999; Palomo *et al.*, 2007). Destacan especies como el corzo (*Capreolus capreolus*), el jabalí (*Sus scrofa*), la nutria (*Lutra lutra*), la comadreja (*Mustela nivalis*), la garduña (*Martes foina*) y el tejón (*Meles Meles*), entre otros.

Infraestructuras lineales

El tramo seleccionado para estudiar la permeabilidad para estos vertebrados en la autovía A-40 cuenta con 26 km de longitud entre el municipio de Naharros (p.k. 276+900) y Cuenca (p.k. 302+900), y según los datos del Mapa de tráfico de 2008, en el momento del estudio presentaba una Intensidad Media Diaria (IMD) de 5780 vehículos/día.

Con el Plan Estratégico de Infraestructuras 2005-2020 del Ministerio de Fomento, se planificó la construcción de varias de líneas de tren de alta velocidad (300 km/h). Una de ellas es la línea de alta velocidad Madrid - Castilla-La Mancha - Comunidad Valenciana - Región de Murcia (Madrid-Levante), de la cual coinciden con el tramo de estudio de la autovía A-40 unos 27,7 km desde el p.k. 161+600 hasta el viaducto sobre el río Júcar en el p.k. 189+300 de la LAV.

Durante el estudio el tramo de la LAV se encontraba en fase de licitación y finalizó en fase de obras. El condicionado



FIGURA 1. Murciélago orejudo (*Plecotus austriacus*) en un paso inferior de la autovía A-40.

FIGURA 2. Área de estudio, en primer plano la autovía A-40 y en segundo plano las obras de construcción de la LAV Madrid-Levante.



de la declaración de impacto ambiental del tramo de la LAV tenía como objetivo disminuir la fragmentación del territorio, la ocupación del suelo y el efecto barrera, es decir, reducir el impacto acumulado de la LAV, de manera que el trazado se proyectó de forma que discurriese lo más próximo y paralelo posible al de la autovía A-40 (Figura 2). La LAV se encuentra en servicio desde principios de 2011 y el administrador de infraestructuras ferroviarias (ADIF) es el encargado de su mantenimiento y explotación.

2.2. SEGUIMIENTO

El estudio se inició en verano de 2006, con una primera campaña, previa al inicio de las obras de la LAV, que fue denominada como *seguimiento control*.

Posteriormente se repitió el seguimiento en la autovía A-40, en diferentes estaciones del año para poder estudiar la variación estacional; así como, analizar el posible efecto de las obras de la LAV sobre los patrones de uso de las estructuras transversales.

La siguiente campaña fue en invierno de 2006-2007, cuando comenzaron los primeros movimientos de tierras y tareas de desbroce para la construcción de la LAV. Las dos últimas campañas fueron en otoño de 2007 y en primavera de 2008, cuando la LAV se encontraba en fase de obras.

Además el área de estudio se dividió en dos tramos en función de la distancia de la autovía A-40 al trazado de la LAV (Figura 3). El primer tramo consta de 10,4 km que discurren entre los municipios de Naharros y Cabrejas y se sitúa a menos de 500 m de las obras, en este tramo dominan los paisajes abiertos con cultivos y bosques dispersos. El segundo tramo con 11,95 km comienza en Cabrejas y termina en Jábaga, todas sus estructuras quedan a más de 950 m de las obras de la LAV, la vegetación en este tramo es más densa, siendo dominantes las formaciones de bosque mixto de quejigar, encinar y pinar.

Para este estudio se han inventariado un total de 76 estructuras transversales en la autovía A-40 y 82 estructuras transversales en la LAV con el fin de caracterizar todos los po-

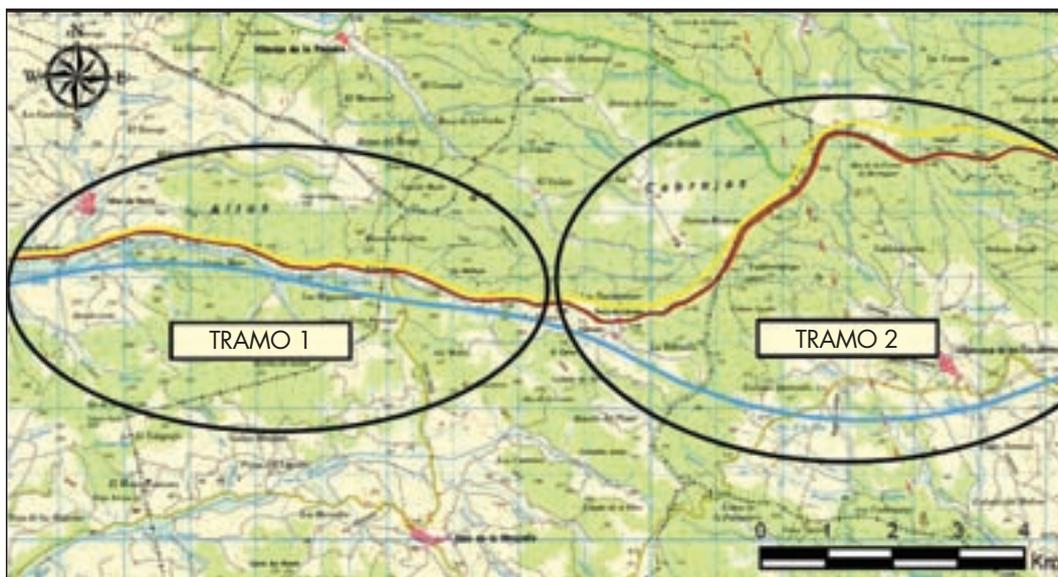


FIGURA 3. Área de estudio y esquema con los dos tramos seleccionados. Autovía A-40 (línea amarilla), línea de tren de alta velocidad Madrid-Levante (línea azul).

Estructuras transversales	Autovía A-40	LAV Madrid-Levante
Drenajes	53	42
Pasos inferiores	17	17
Pasos superiores	6	8
Viaductos	–	10
Túneles	–	5
TOTAL	76	82

TABLA 1. Número de estructuras transversales inventariadas por tipología en las dos infraestructuras lineales del área de estudio.

sibles lugares de paso para la fauna (Tabla 1). Para ello, se han utilizado una serie de variables descriptivas, por un lado del entorno en el que se encuentran (vegetación circundante, localización geográfica), y por otro, de la propia estructura (dimensiones, accesos, materiales de construcción, etc.).

Se ha utilizado el índice de abertura como variable informativa del efecto túnel de la estructura (Olbrich, 1984), calculado a partir de las dimensiones del paso (sección de la embocadura/ longitud).

Para la autovía A-40 obtenemos un valor medio de 2,92 estructuras por km lineal de autovía, muy similar al de la LAV Madrid-Levante con 2,96 estructuras por km en el área de estudio.

En la autovía A-40 la mayor parte de las estructuras están destinadas originalmente a la restitución de carreteras y caminos, así como al drenaje de la calzada, mientras que en la LAV encontramos estructuras con mayor permeabilidad como son los viaductos, túneles y pasos sobredimensionados adecuados para la fauna.

De las estructuras inventariadas se seleccionaron para su seguimiento un total de 30 estructuras en la autovía A-40, 15 en el tramo cercano a las obras de la LAV y otras 15 en el tramo alejado del trazado de la LAV, con el fin de obtener una muestra representativa de los diferentes tipos de estructuras que existen en la autovía A-40.

El método de control utilizado fue el registro de huellas mediante marmolina (Yanes *et al.*, 1995) y un sistema fotográfico activado por un sensor de infrarrojos utilizado en otros estudios para el seguimiento de los pasos de fauna (Mata *et al.*, 2006). En cada campaña se realizó el seguimiento de cada estructura, hasta completar 15 días válidos para los dos métodos de control conjuntamente.

2.3. TRATAMIENTO DE DATOS

En una primera aproximación, se ha calculado el índice de uso (I.U.) de cada una de las especies de vertebrados, para estudiar los patrones generales de uso en cada tipo de estructura de paso. Este índice se define como:

$$I.U. = (n_{ij} / e_j) / (N_i / E)$$

Donde: n_{ij} es el número de observaciones-día para una especie o grupo faunístico (i) en un tipo de estructura (j); e_j es el número total de estructuras (j); N_i es el número de observaciones-día para una especie o grupo faunístico en el total de estructuras y E es el número total de estructuras controladas en el estudio (Mata *et al.*, 2006).

Posteriormente, se ha analizado el número total de especies que utilizan las distintas estructuras transversales de la autovía A-40. Para ello, se ha llevado a cabo un análisis de la varianza mediante un MANOVA (STATISTICA 6.1, StatSoft, 2002), tomando como unidad de análisis la riqueza faunística registrada en cada una de las campañas e incluyendo como factores, por un lado, el tramo en el que la estructura transversal está localizada y por otro, la tipología de ésta, distinguiendo a su vez tres categorías: drenaje, paso inferior y paso superior. No se ha podido diferenciar entre que un paso este diseñado específicamente para la fauna o no, puesto que en el tramo de autovía seleccionado, sólo hay un paso inferior específico y ningún paso superior específico.

A continuación, teniendo en cuenta solamente las campañas de seguimiento realizadas una vez iniciada la fase de construcción de la LAV, se ha analizado de nuevo la riqueza específica registrada, pero esta vez empleando un análisis MANCOVA (STATISTICA 6.1 StatSoft, 2002), en el cual se ha incluido la distancia a las obras como covariable y se ha retirado por tanto esta diferencia entre tramos.

Finalmente, mediante la utilización de técnicas de análisis multivariante se han caracterizado los patrones generales de las especies que han utilizado las estructuras transversales de la autovía A-40.

La unidad básica de análisis es el número de días en los que ha sido registrada la especie (o grupo faunístico) en un paso, combinando la información procedente de los dos métodos de control: el registro de huellas y el sistema fotográfico. Se ha usado un análisis de correspondencias canónicas basado en ordenaciones, utilizando para ello el paquete estadístico CANOCO 4.5. (ter Braak y Smilauer, 2002). Las variables consideradas para la construcción del modelo son:

- La tipología de la estructura (Paso superior, Drenaje o Paso inferior).
- La localización o tramo de estudio en función a la distancia a la LAV Madrid-Levante.
- La estacionalidad, representada por la época del año en la que se llevó a cabo la campaña de seguimiento, cubriendo el ciclo anual completo.
- Y la actividad humana, representada por la suma de registros derivados del tránsito por los pasos de personas a pie, ganado y vehículos.

3. RESULTADOS

3.1. USO DE LAS ESTRUCTURAS DE PASO

La interpretación conjunta de los datos, teniendo en cuenta la variación estacional, la proximidad de las obras de la LAV y como situación de partida o *seguimiento control* la primera campaña en verano de 2006, nos revelan qué especies utilizan las estructuras transversales de la autovía A-40 y qué variables son más importantes.

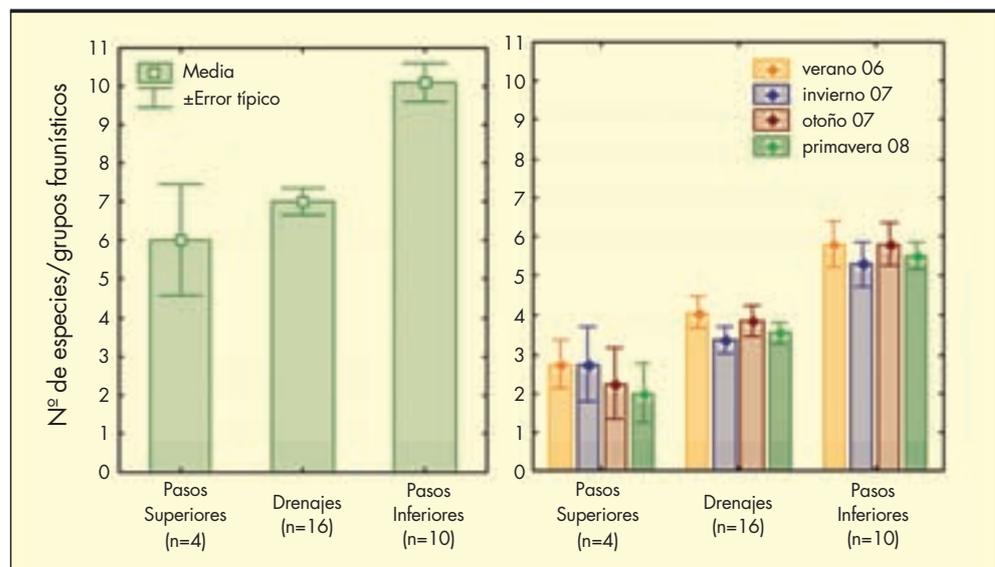
Al término de las cuatro campañas de seguimiento se ha obtenido una media de 0,99 registros por día y paso. De las 20 especies o grupos faunísticos registrados, los micromamíferos son el grupo que con mayor frecuencia ha utilizado las distintas estructuras. Con frecuencias algo menores se han registrado gatos domésticos, zorros, tejones y garduñas; el resto de las especies han mostrado frecuencias inferiores (Tabla 2).

La riqueza específica registrada en las distintas estructuras transversales de la autovía A-40 refleja diferencias entre los distintos tipos de pasos, las cuales parecen mantenerse independientemente de la época del año (Figura 4).

	Pasos Superiores n= 4	Drenajes n= 16	Pasos Inferiores n= 10	Media
Especies				
Erizo común (<i>Erinaceus europaeus</i>)	–	–	0,003	0,001
Lirón careto (<i>Eliomys quercinus</i>)	–	–	0,002	0,001
Ardilla roja (<i>Sciurus vulgaris</i>)	–	0,018	0,038	0,022
Ratas de agua (<i>Arvicola sapidus</i>)	–	0,013	0,003	0,008
Comadreja (<i>Mustela nivalis</i>)	–	0,014	–	0,007
Garduña (<i>Martes foina</i>)	0,021	0,097	0,128	0,097
Tejón (<i>Meles meles</i>)	–	0,123	0,098	0,098
Nutria (<i>Lutra lutra</i>)	–	0,001	–	0,001
Gato doméstico (<i>Felis catus</i>)	0,029	0,114	0,172	0,122
Gato montés (<i>Felis silvestris</i>)	–	0,006	0,010	0,007
Zorro rojo (<i>Vulpes vulpes</i>)	0,029	0,042	0,235	0,104
Perro (<i>Canis familiaris</i>)	0,013	0,008	0,087	0,035
Corzo (<i>Capreolus capreolus</i>)	–	–	0,003	0,001
Liebre (<i>Lepus granatensis</i>)	0,008	0,003	0,075	0,028
Conejo (<i>Oryctolagus cuniculus</i>)	–	–	0,002	0,001
Grupos faunísticos				
Anuros	0,008	0,002	0,010	0,006
Lacértidos	0,025	0,038	0,015	0,028
Micromamíferos	0,104	0,468	0,287	0,359
Ratas	0,004	0,023	0,008	0,016
Lagomorfos	0,042	0,005	0,108	0,044

TABLA 2. Media de registros diarios por estructura de las especies y grupos específicos teniendo en cuenta las cuatro campañas de seguimiento realizadas en la autovía A-40. n: número de estructuras controladas.

FIGURA 4. Datos medios de la riqueza faunística detectada mediante el registro de huellas y/o el sistema fotográfico por cada uno de los tipos de estructura en la autovía A-40. A la izquierda está representada la riqueza total y a la derecha desglosada por campañas.



FACTOR	MC	F	g.l.	P
Tipo	16,089	9,333	2	0,001
Tramo	18,837	10,926	1	0,003
Tipo*Tramo	2,889	1,676	2	0,208

TABLA 3. Resultados del MANOVA sobre el efecto del tipo de paso y el tramo en el que se localiza la estructura. g.l.: grados de libertad. En negrita se muestran los valores significativos.

Un análisis en mayor profundidad de las diferencias en cuanto al número total de especies que utilizan las estructuras, ha reflejado el papel preponderante que desempeña el factor tipo de paso, así como la localización del paso dentro de los dos tramos distinguidos (Tabla 3). Por un lado, el número de especies que utilizan los pasos inferiores es significativamente mayor respecto a los otros dos tipos. Asimismo, las estructuras localizadas en el tramo de Cabrejas-Jábaga (Tramo 2) son utilizadas por un número de especies significativamente mayor en comparación con el tramo 1 de Naharros-Cabrejas.

Las diferencias encontradas entre tramos podrían deberse a la afección de las obras del tren de alta velocidad. No obstante, para comprobar dicho efecto es necesario caracterizar las posibles diferencias entre tramos antes del inicio de las obras, para ver si éstas se mantienen o no en las siguientes campañas. En la Figura 5. se observan las diferencias entre tramos antes del inicio de las obras.

Estas diferencias entre zonas, se asociaban con la “distancia a la obra” antes incluso de que ésta comenzase ($F=3,82$; $g.l.=2$; $p=0,023$). Es decir, los pasos más alejados a la zona donde se proyectó el trazado de la LAV, presentaban ya al inicio de la investigación un número ligeramente mayor de especies ($\beta \approx 0,001$) sin que las obras hubiesen comenzado, esto equivaldría a una especie más cada 1.000 m de distancia a las obras.

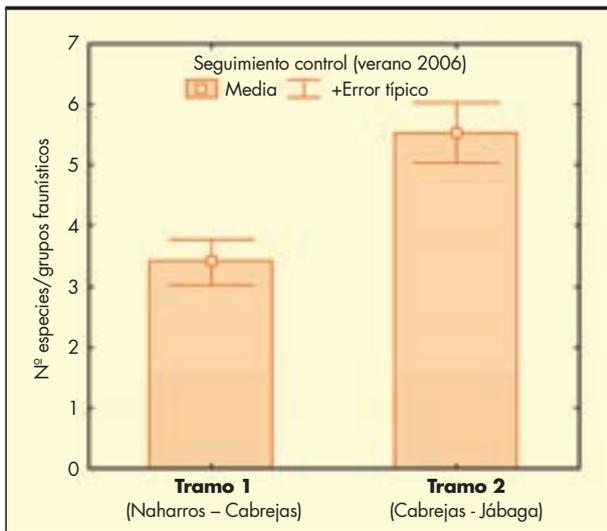


FIGURA 5. Datos medios de la riqueza faunística detectada por tramo en la autovía A-40 durante el seguimiento control anterior al inicio de las obras de la LAV Madrid-Levante.

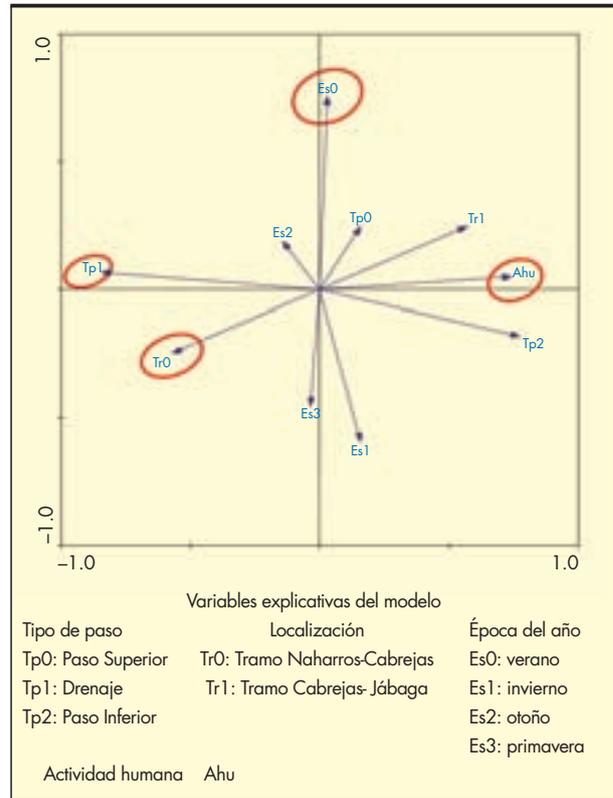


FIGURA 6. Modelo completo del análisis de correspondencias canónicas, incluye todas las variables independientes. En rojo se señalan las variables significativamente más explicativas.

Por tanto, el que este parámetro resulte también positivo, y de orden de magnitud similar (β positivo, pero menor de 0,001) en las tres campañas de campo posteriores al inicio de las obras, debe entenderse que es un reflejo de la mayor riqueza de especies del entorno del tramo 2, no pudiendo adscribirse a un efecto de la obra.

3.2. PATRONES DE SELECCIÓN DE LOS VERTEBRADOS

Con el fin de revelar posibles patrones generales de uso de las estructuras por las especies de vertebrados terrestres, se ha realizado un análisis multivariante de correspondencias canónicas basado en ordenaciones. En primer lugar se ha construido un modelo teniendo en cuenta una serie de variables independientes de interés (Figura 6). Posteriormente, se han seleccionado las variables más explicativas con las que se ha generado un nuevo modelo, con el que finalmente interpretar los posibles patrones.

El patrón general de utilización de las distintas estructuras transversales por parte de las especies, tal y como muestran los resultados (Figura 7), puede describirse distinguiendo:

- Especies que utilizan preferentemente los drenajes (Tp1).
- Especies o grupos faunísticos registradas con mayor frecuencia en las estructuras situadas en el tramo de Naharros-Cabrejas cercano a la LAV Madrid-Levante (Tr0).
- Especies que aparecen asociadas al periodo estival (Es0).
- Especies o grupos que se muestran influidas por la actividad humana (Ahu).

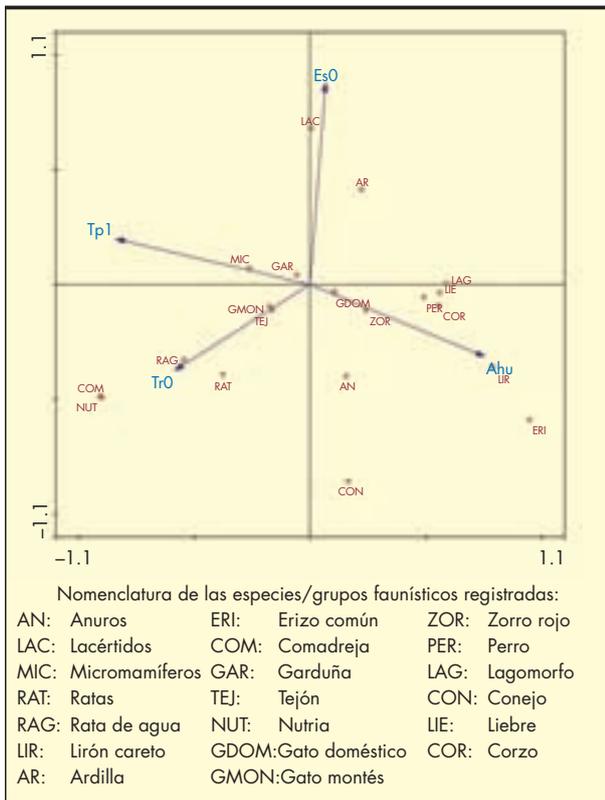


FIGURA 7. Modelo reducido del análisis de correspondencias canónicas, incluye las cuatro variables independientes que resultaron significativas en el modelo completo.

El modelo finalmente construido con estas variables presenta un buen ajuste, llegando a explicar aproximadamente el 30% de la varianza ($F= 4,28; p < 0,001$).

Analizando la configuración espacial de las especies y las variables independientes, tal y como queda representada en la Figura 7 es posible diferenciar determinados patrones:

Garduñas y micromamíferos aparecen asociados a la tipología denominada *Drenaje*, la cual incluye estructuras tanto de sección circular como de marco (Figura 8). Prueba de ello, es que ambos han sido detectados de forma mayoritaria en este tipo de estructuras (70% de los micromamíferos y el 53% de las garduñas). En contraposición, aparecen especies que se muestran asociadas a los pasos inferiores, tales como zorro rojo, liebre, corzo, erizo común y lirón careto. Todas ellas los han utilizado preferentemente o de forma exclusiva, con más del 75% de los registros en este tipo de estructuras.

Especies como rata de agua, rata, comadreja y nutria pueden caracterizarse de forma asociada al primer tramo situado entre Naharros y Cabrejas cercano a la LAV y área por donde discurre el arroyo Cigüela entre cultivos y zonas de matorral, en estructuras influenciadas por la tipología *Drenaje* con baja actividad humana. (Figura 9).

Lacértidos y ardillas se muestran asociadas al periodo estival. En ambos casos más del 60% de los registros se han obtenido en la campaña de seguimiento realizada en verano de 2006

En relación con la actividad humana registrada en los pasos, se observa un incremento de registros de gato doméstico y perro en las estructuras donde se han producido un mayor número de registros derivados del tránsito de personas, ganado y/o vehículos. A priori, puede parecer que corzo, lirón careto y erizo común se asocian a estructuras con alta actividad humana, pero las únicas estructuras utilizadas por estas especies han sido los pasos inferiores, los cuales han tenido una gran frecuentación humana, y es por esto y por el bajo número de registros de las mismas, por lo que no se han diferenciado más de esta variable.

Por último, especies como gato montés y tejón aparecen asociados a estructuras con niveles bajos de actividad humana. El 92% de los registros de gato montés y el 85% de tejón se han detectado en pasos con menos de 0,1 registros relativos a actividad humana por día (Figura 10).



FIGURA 8. Garduña (*Martes foina*) en un drenaje circular de la autovía A-40.



FIGURA 9. Nutria (*Lutra lutra*) en un drenaje marco de la autovía A-40.



FIGURA 10. Tejón (*Meles meles*) en un drenaje marco de la autovía A-40.

4. DISCUSIÓN

Una vez completado un ciclo anual de seguimiento en la autovía A-40 se ha podido constatar el elevado número de especies que hacen uso de las distintas estructuras transversales. Para el conjunto de éstas se observa un patrón de selección general determinado fundamentalmente por el tipo de paso, la localización del mismo en uno u otro de los tramos diferenciados en este estudio y en menor medida por la actividad humana registrada en los mismos y por la estacionalidad.

Las especies de pequeño tamaño como roedores, así como distintas especies de mustélidos, tales como comadreja, nutria y garduña, han utilizado preferentemente estructuras estrechas como los drenajes, en consonancia con los resultados presentados en estudios previos (Andreassen *et al.*, 1996; McDonald y Cassady 2004; Mata *et al.*, 2006). Las de mayor tamaño, zorros, lagomorfos y corzos han cruzado mayoritariamente por pasos amplios inferiores fundamentalmente mixtos, dado que sólo hay un paso inferior específico en toda la autovía. Estos resultados refuerzan el papel complementario de los distintos tipos de estructuras (Mata *et al.*, 2005).

El seguimiento de las estructuras en cada uno de los dos tramos seleccionados ha mostrado diferencias entre ambos. Estas diferencias existían previamente a la fase de obras y no parecen haberse acentuado con el comienzo de las mismas. Las diferen-

cias encontradas parecen reflejar una mayor riqueza y abundancia de especies en el tramo 2 de Cabrejas a Jábaga. Este tramo discurre por áreas más boscosas y de vegetación más densa, lo que propicia esta mayor densidad respecto al otro tramo de paisajes más abiertos y más intervenido por el hombre.

Respecto a la variación estacional, las diferencias entre las cuatro campañas no han sido muy acusadas, registrándose en la campaña primaveral la mayor riqueza de especies. Excepto en lacértidos y ardillas en los que la estacionalidad ejerce una mayor influencia, cuyos máximos poblacionales se producen durante el estío (Purroy y Varela, 2003).

El efecto de la frecuentación humana sobre el uso de los pasos por la fauna se considera en general negativo (Iuell *et al.*, 2005). La actividad humana registrada en los pasos parece condicionar su utilización por gatos monteses y tejones, mostrando ambas especies un uso preferente de las estructuras con menor actividad humana. Por el contrario, gatos domésticos y perros aparecen asociados a los pasos con mayor frecuentación humana. Resultados en ambos casos esperables, puesto que las primeras dos especies evitan al hombre, mientras que las dos últimas conviven con él.

Hay que destacar el escaso número de registros relativos a cruces de corzo y la ausencia de registros de jabalíes y ciervos, pese a tratarse de especies abundantes en el área de estudio.

Los elementos claves para interpretar la escasa utilización de las estructuras por parte de los ungulados probablemente sean la ubicación y el diseño de las mismas. Una ubicación adecuada de las estructuras es determinante para garantizar su efectividad (Beier y Loe, 1992; Rosell y Velasco, 1999; Forman *et al.*, 2003). No obstante cuando se trata de pasos de carácter mixto, como son la mayoría de los pasos controlados en la autovía A-40 (sólo cuenta con un paso específico para la fauna), la localización de éstos responde a otras necesidades relacionadas con la actividad humana y carecen de una perspectiva ecológica (van der Grift, 1999).

5. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones que se pueden extraer de este estudio son, que la utilización de las estructuras transversales de la autovía A-40 por parte de las especies registradas, no parece verse afectada por la ejecución de las obras de la LAV Madrid-Levante, cuyo trazado discurre en paralelo a esta vía en el primer tramo de estudio.

Sin embargo, sí se observa que las especies registradas muestran un patrón de selección general, determinado fundamentalmente por factores como el diseño estructural del paso o la localización espacial del mismo y en menor medida por la estacionalidad y la actividad humana registrada en los mismos.

Por último, esta investigación aporta datos interesantes relativos al periodo anterior y simultáneo a la ejecución de la LAV, los cuales podrían resultar muy valiosos en una investigación futura, ya que la LAV Madrid-Levante está actualmente en plena explotación y se pueden evaluar otros factores derivados de su funcionamiento, además de conseguir analizar o comparar los patrones generales de uso de las estructuras transversales de las especies del entorno, con la situación previa.

6. AGRADECIMIENTOS

Este artículo se enmarca dentro del Convenio de Colaboración para la Asistencia Técnica en Temas de Calidad y Evaluación Ambiental, efectuado entre el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; y se ha podido desarrollar gracias al Grupo de Ecología Terrestre de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM) y a una beca de formación de personal investigador del CEDEX. Por último, agradecer a la Comunidad de Madrid que junto al Fondo Social Europeo cofinancian al Grupo de Investigación en Ecología y Conservación de Ecosistemas Terrestres de la UAM a través del Programa REMEDINAL (S-0505/AMB/0335 y S-2009/AMB/1783).

7. REFERENCIAS

- Andreassen, H. P., Halle, S. y Ims, R. A. (1996). Optimal Width of Movement Corridors for Root Voles: Not Too Narrow and Not Too Wide. *Journal of Applied Ecology*, **33**: 63-70.
- Banco de Datos de la Naturaleza (2006). Mapa Forestal de España. Escala 1:50.000 *MFE50*. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal. Ministerio de Medio Ambiente, y Medio Rural y Marino.
- Barbadillo, L. J., Lacomba, J. I., Pérez-Mellado, V., Sancho, V. L. F. y López-Jurado. (1999). Anfibios y Reptiles de la Península Ibérica, Baleares y Canarias. Guía ilustrada para identificar y conocer todas las especies. 419 pp. Editorial Planeta, Barcelona.
- Beier, P. y Loe, S. (1992). A Checklist for Evaluating Impacts to Wildlife Movement Corridor. *Wildlife Society Bulletin*, **20**: 434-440.
- Blanco, J. C. (1998). Mamíferos de España I y II. pp. 457 (I) y 382 (II). Editorial Planeta, S.A., Barcelona.
- Forman, R., Sperling, D., Bissonette, J. A., Clevenger, A. P., Cutshall, C. D., Dale, V. H., Fahrig, L., France, R., Goldman, C. R., Heanue, K., Jones, J. A., Swanson, F. J., Turrentine, T. y Winter, T. C. (2003). *Road Ecology. Science and Solutions*. pp. 481. Island Press, Washington, DC.
- Iuell, B., Bekker, G. J., Cuperus, R., Dufek, J., Fry, G., Hicks, C., Hlaváč, V. B., Rosell, C., Sangwine, T., Torslov, N., Wandall, B. y le Maire, E. (2005). *Fauna y Tráfico: Manual europeo para la identificación de conflictos y el diseño de soluciones*. Servicio de Publicaciones. Organismo Autónomo Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente.
- Krausman, P. R. y Harris, L. K. (2011). *Cumulative Effects in Wildlife Management: Impact Mitigation*. CRC Press. Boca Raton, FL, USA.
- Lodé, T. (2000). Effect of a motorway on mortality and isolation of wildlife populations. *AMBIO, A Journal of the Human Environment*, **29**: 163-166.
- Mata, C., Hervás, I., Herranz, J., Suárez, F. y Malo, J. E. (2005). Complementary use by vertebrates of crossing structures along a fenced Spanish motorway. *Biological Conservation*, **124**: 397-405.
- Mata, C., Hervás, I., Suárez, F., Herranz, J., Malo, J. E., Cachón, J. y Varela, J. M. (2006). Análisis de la efectividad de los pasos de fauna en un tramo de la autovía de las Rías Bajas (A-52). *Ingeniería Civil*, **142**: 89-97.
- McDonald, W. y Cassady, C. (2004). Elements that promote highway crossing structure use by small mammals in Banff National Park. *Journal of Applied Ecology*, **41**: 82-93.
- Ministerio de Fomento (2005). PEIT Plan estratégico de infraestructuras y transporte 2005-2020. pp. 182. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica, Ministerio de Fomento, Madrid.
- Ministerio de Fomento (2008). Mapa de Tráfico 2008. Centro de Publicaciones. Dirección General de Carreteras, Madrid.
- Olbrich, P. (1984). Study of the Effectiveness of Game Warning Reflectors and the suitability of Game Passages. *Zeitschrift Fur Jagdwissenschaft*, **30**: 101-116.
- Palomo, L., Gisbert, J. y Blanco, J. C. (2007). Atlas y Libro Rojo de los mamíferos terrestres de España. Dirección General de Conservación de la Naturaleza-SECEM-SECEMU, Madrid.
- Purroy, J. y Varela, J. M. (2003). Guía de los Mamíferos de España. Península, Baleares y Canarias. Lynx Edicions. Barcelona.
- Rodríguez, A., Crema, G. y Delibes, M. (1996). Use of non-wildlife passages across a high speed railway by terrestrial vertebrates. *Journal of Applied Ecology*, **33**: 1527-1540.
- Rosell, C. y Velasco, J. M. (1999). Manual de prevenció i correcció dels impactes de les infraestructures viàries sobre la fauna. pp. 95. Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient, Catalunya.
- StatSoft, I. (2002). STATISTICA (data analysis software system), version 6.
- Ter Braak, C. y Smilauer, P. (2002). *CANOCO Reference Manual and CanocoDraw for Windows User's Guide: Software for Canonical Community Ordination (version 4.5)*. NY, EE.UU.
- Van der Grift, E. A. (1999). Mammals and railroads: impacts and management implications. *Lutra*, **42**: 77-98.
- Yanes, M., Velasco, J. M. y Suarez, F. (1995). Permeability of roads and railways to vertebrates: the importance of culverts. *Biological Conservation*, **71**: 217-222.

Influencia de las vías rápidas en la distribución geográfica de la clientela de cuatro mercados de Madrid¹

JULIO POZUETA ECHAVARRI (*) y FRANCISCO JOSÉ LAMÍQUIZ DAUDÉN (**)

RESUMEN El trabajo trata de investigar el efecto que las vías rápidas urbanas (calles de más de 4x2 carriles, normalmente reguladas por semáforos que les dotan de prioridad de paso) tienen en los desplazamientos peatonales. Para ello se ha estudiado, en varios mercados municipales de la ciudad de Madrid, la procedencia de los compradores, evaluando la distribución de estos en su entorno y el efecto que la presencia de una vía rápida urbana tiene sobre dicha distribución, en el sentido de deformar el Hinterland teórico del mercado a un lado y otro de ésta. Y se han encontrado evidencias suficientes para confirmar la hipótesis de que una vía de este tipo actúa como una barrera a los desplazamientos peatonales. Los resultados confirman y adaptan al entorno español los de investigaciones similares en otros países, y ponen de manifiesto la importancia de atemperar el tráfico intra-urbano, para mantener y promover funciones tradicionalmente urbanas, como la comercial.

THE IMPACT OF ARTERIAL ROADS ON THE HINTERLAND OF FOUR TRADITIONAL MARKETS OF MADRID

ABSTRACT *The study aims to investigate the impact of urban arterial roads (4x2 or more carriageways with traffic lights regulated intersections) on pedestrians' trips. Clients' origins were investigated in four municipal markets in Madrid, in order to evaluate how the presence of a arterial road could affect market's hinterland (i.e., geographical distribution around the market). Evidences were found to affirm that this type of roads produce what the literature call a barrier effect to pedestrian movement. The results confirm similar investigations in other countries, and highlight the importance of calming intra-urban traffic, to promote some urban functions, such as traditional markets.*

Palabras clave: Desplazamientos peatonales, Movimientos peatonales, Barreras urbanas, Vías rápidas urbanas, Barreras peatonales, Densidad urbana, Distribución urbana, Hinterland urbano.

Keywords: Pedestrian trips, Pedestrian movement, Urban barriers, Urban arterial roads, Pedestrian barriers, Severance, Urban density, Urban distribution, Urban hinterland.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

Este trabajo es fruto del proyecto de investigación "Modelos urbanos orientados a los modos no motorizados: LA CIUDAD PASEABLE", que fue realizado con una subvención del CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACIÓN DE

OBRAS PÚBLICAS del Ministerio de Fomento (PT-2006-036-09ICCP).

El proyecto de investigación incluyó ocho investigaciones específicas sobre la incidencia de diferentes aspectos del entorno urbano en la movilidad peatonal:

1. Navegación a través de la trama urbana y motivos de los desvíos en los recorridos peatonales.
2. Percepción de atractivos (y barreras) para los desplazamientos peatonales.
3. Incidencia de la densidad y la mezcla de usos.
4. Importancia de las características de la estructura viaria.
5. Importancia del diseño de la vía pública.
6. La configuración y los usos de la planta baja de la edificación.
7. Los atropellos y su relación con la trama urbana.
8. Incidencia de las grandes vías en la movilidad peatonal.

(*) Doctor ICGP, Catedrático. Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio. E.T.S. de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Juan de Herrera 4. MADRID. E-mail: julio.pozueta@upm.es

(**) Doctor Arquitecto. Profesor Asociado Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio. E.T.S. de Arquitectura. Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Juan de Herrera 4. MADRID. E-mail: francisco.lamiquiz@upm.es

1 Las ilustraciones y el apoyo en la investigación fueron realizadas por Hugo Anaximandro Rial, becario del proyecto y estudiante de arquitectura.

Las mismas se recogen en Pozueta, J. (Dir.): INFORME CIENTÍFICO n.º1: ANALISIS DE LA INCIDENCIA DE LOS RASGOS URBANÍSTICOS EN LA MOVILIDAD PEATONAL. Documento sin publicar. Departamento de Urbanismo y Ordenación del Territorio. Universidad Politécnica de Madrid. También se glosan en el libro producto del mismo proyecto: Lamíquiz, F.; Pozueta, J. (Dir.); Porto, M. (2009): La Ciudad Paseable. Recomendaciones para un planeamiento, un diseño urbano y una arquitectura considerada con los peatones. CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid.

El objetivo central de esta investigación es comprobar hasta que punto la presencia de vías urbanas rápidas, de una cierta anchura e intensidad de tráfico, puede suponer una barrera para los desplazamientos peatonales y deformar el área de influencia comercial de determinados establecimientos.

Un objetivo secundario sería precisar el radio de influencia o *Hinterland* que tienen actualmente los mercados para los desplazamientos a pie.

La investigación tiene interés desde varios puntos de vista, como la localización comercial, la estrategia de localización de equipamientos comerciales por el planeamiento, la influencia de las grandes vías arteriales en los usos de sus bordes, etc. El que anima específicamente a esta investigación es el deseo de conocer hasta qué punto las vías urbanas rápidas pueden constituir una barrera a los desplazamientos peatonales, a pesar de que existan los acondicionamientos confortables y seguros para atravesarla.

Se trata, por tanto, de indagar en el efecto psicológico que las vías rápidas urbanas, con sus dimensiones, su ruido, su estresante ambiente, su mayor peligrosidad, etc., pueden tener sobre los peatones, aumentando el esfuerzo psíquico que requieren los desplazamientos que las atraviesan y alargando psicológicamente los recorridos más de lo que sus dimensiones y el tiempo de atravesarlas implican.

La hipótesis subyacente al proyecto de investigación puede ser obvia para el lector: que las vías urbanas rápidas suponen un obstáculo psicológico para los desplazamientos peatonales y deforman el “*Hinterland*” de determinados establecimientos en relación a ellos. Sin embargo, hasta donde estos autores conocen, no existen referencias similares en nuestro entorno.

1.2. ESTADO DEL ARTE

El estudio del comportamiento de los peatones tiene varios orígenes. Puede decirse que comenzó del estudio de las perturbaciones de tráfico y los accidentes debidos al cruce de peatones en intersecciones señalizadas o no y de la necesidad de afrontar el problema (Tanner, 1951; Mayne, 1954; Lefkowitz, 1955; Fleig, 1967; Goldschmidt, 1977; Harrell, 1991). Esta aproximación, centrada en los problemas que crean al tráfico los peatones, continúa generando una importante cantidad de literatura especializada.

Una segunda aproximación al movimiento y comportamiento de los peatones procede de la necesidad de resolver los problemas de diseño de los pasillos peatonales masivamente utilizados en el interior de edificios (centros comerciales, corredores de metro, etc.) y en espacios públicos (pasos elevados y subterráneos para peatones, aceras comerciales muy frecuentadas) y, particularmente, de calcular sus dimensiones óptimas, para minimizar su coste, evitando la congestión (Dabbs, 1975; Whyte, 1988; Dixon, 1996; Turner, 2002; Daamen, 2003; Hoogendoorn, 2005). La mayoría de estos estudios afrontan el estudio de los flujos peatonales usando métodos en general diseñados para estudiar el tráfico de vehículos, de instituciones como AASHTO, y tratando de utilizar conceptos como “capacidad” y “nivel de servicio” (Older, 1968; Wolff,

1973; Glampson, 1977; Pushkarev, 1975; Dabbs, 1975; Dixon, 1996; Highway Capacity Manual, 2000; Hoogendoorn, 2003; Hoogendoorn, 2005). Más recientemente, esta aproximación ha desarrollado una importante sección centrada en la modelización de los movimientos peatonales (Helbing, 1995; Helbing, 1998; Blue, 2000; Kukla, 2001; Osagari, 2004; Wakim, 2004; Antonini, 2006; Dapper, 2006; Hoogendoorn, 2007).

Una tercera aproximación ha tratado de afrontar la relación entre el comportamiento de los peatones y el ambiente construido (“*built environment*”), entendido este como la suma de estructura, tramas, vías, edificios y usos, con dos líneas básicas de interés: una, centrada en el estudio de la influencia del ambiente construido sobre la elección del modo de viaje, y particularmente, sobre el número de desplazamientos peatonales y, derivado de ello, la cantidad de actividad física (“*active travel*”); y otra, que investiga las que trata de identificar las condiciones del entorno construido que facilitan la vida social en el espacio público, más allá de su uso como corredores de movilidad.

Susan Handy revisó la primera de estas líneas en su “Evaluación crítica de la literatura sobre las relaciones entre transporte, usos del suelo y actividad física” (Handy, 2005, 2), afirmando que “Estos estudios proporcionan evidencias convincentes de que existe una relación entre el entorno construido y la actividad física. Pero proporcionan evidencias menos convincentes sobre qué características del entorno construido están más fuertemente asociadas a la actividad física”. En su revisión bibliográfica, Handy distingue tres componentes en el entorno construido: patrón de usos del suelo, el sistema de transporte y su diseño, y los aspectos visuales y de detalle de dicho entorno (estilos, texturas, color y ornamentación). Trabajos sobre esta macro visión del tema, centrados en las principales características y elementos del entorno construido (densidad, usos del suelo, escala de la calle y características del diseño) vienen siendo publicados por investigadores de numerosos países desde hace tiempo, como puede verse en Ewing (Ewing, 2001).

Finalmente, la segunda línea de investigación sobre la relación entre el ambiente construido y el comportamiento peatonal, emana en gran medida de los argumentos de Jane Jacobs (Jacobs, 1961) sobre como la vida social en los espacios públicos está asociada a los peatones y como ambos son dependientes de la presencia de “ojos sobre la calle” (“*eyes upon the street*”), a través de edificios con vistas de ventanas y puertas sobre la calle. Diez años después, el estudio de Jan Gehl sobre la vida entre los edificios (“*life between buildings*”, Gehl, 1971) detectó diferencias sensibles entre el comportamiento de los peatones en función de su tipo de desplazamiento, distinguiendo entre: actividades obligadas (desplazamientos al trabajo, a la escuela, etc.), en cuyos itinerarios el entorno edificado tendría sólo una relativa influencia, con mayor presión del tiempo de desplazamiento; las actividades opcionales, es decir, las que pueden desarrollarse en diferentes rutas o lugares (pasear, sentarse,...) y sobre las que las características del entorno edificado pueden tener una importante influencia; y actividades sociales (hablar, jugar, etc.), derivada de la presencia de las dos anteriores. Gehl aportó, asimismo, un amplio panorama de las características y detalles del entorno construido responsables de la calidad del espacio público para las actividades optativas y sociales. Appleyard (Appleyard, 1981), Whyte (Whyte, 1980) o Rappaport (Rappaport, 1987) han desarrollado interesantes aspectos de esta relación, como la seguridad, el clima o la complejidad.

¹ Traducción propia.

En este contexto, dentro del estudio de las relaciones entre el entorno construido y el comportamiento de los peatones, un poco a caballo entre las dos aproximaciones citadas y, en cierta medida, en una aproximación inversa a la que consideraba a los peatones como perturbadores del tráfico automovilístico, se ha ido conformando una línea específica de investigación referida a las barreras que suponen determinados elementos o características urbanas sobre los desplazamientos peatonales y, en particular, sobre los efectos de las vías rodadas y el tráfico sobre éstos. Se trata del denominado efecto barrera ("barrier effect" o "severance").

El manual británico de "roads and bridges" define el efecto barrera o "severance" como "la separación de los residentes de los equipamientos y servicios que usan en su comunidad, causada por nuevas o mejoradas vías rodadas o por cambios en los flujos de tráfico". Para el Victoria Transport Policy Institute, "El efecto barrera, también llamado "severance" se refiere a los retrasos, falta de confort y limitaciones de acceso que el tráfico vehicular impone a los modos no motorizados (peatones y ciclistas)". De acuerdo con este Instituto, "severance" usualmente se aplica más al impacto de nuevas vías o a la ampliación de las existentes, mientras que efecto barrera se aplicaría más al impacto de los flujos de tráfico⁴.

Aunque el origen de este concepto suele datarse hacia 1924, realmente, no es hasta los años 50-60, del pasado siglo, dependiendo de los países, cuando comienza a describirse el problema y, poco después, en los 70, a investigarse con cierta seriedad. Hasta esos años, la mayor parte de los desplazamientos urbanos se hacían a pie o en bicicleta, pero en esa década se produce un progresivo trasvase de estos medios al automóvil, provocado en parte por la inseguridad que introduce en los desplazamientos el aumento progresivo del tráfico rodado y la necesidad de atravesar las vías donde este se concentra (VTPI, 2012).

La producción científica sobre esta temática tiene ya cierta tradición (Lee 1976; Grigg, 1983) y ha sido en cualquier caso importante y en ella se abordan distintos aspectos de la misma, existiendo ya algunos textos en los que se resume la producción reciente (Clark, 1991; Guo, 2001; Bradbury, 2007) o los impactos concretos en distancia o tiempo que tienen las grandes vías de tráfico sobre los desplazamientos peatonales (Jacobsen 2009; Tirachini, 2011). Esta línea de investigación se ha centrado en gran medida en el estudio del efecto barrera del tráfico en carreteras suburbanas y mucho menos en calles urbanas céntricas. También, en el estudio de los costos que deben asociarse a la construcción de carreteras con motivo de los perjuicios que ocasionan a los desplazamientos no motorizados (Stanley, 1978; Saelensminde, 1992; Rintoul, 1995; Russell, 1996; Tate, 1997), estudios que llevaron a las administraciones de carreteras de Dinamarca y Suecia a incluirlos en el cálculo de sus costos y externalidades (SNRA, 1986; DRD, 1992).

El ámbito que pretende explorar la presente investigación, es el efecto barrera que produce el tráfico regulado de las grandes calles en los centros urbanos, tomando como referencia los desplazamientos de compras. Sobre el efecto barrera del tráfico en los desplazamientos de compras, existen algunas referencias en la literatura especializada. Susan Handy (Handy, 2001) proporciona los resultados de un amplio estudio en Austin, Texas, en la que los compradores manifiestan que a pesar de su deseo de ir andando a comprar, se ven empujados al uso del automóvil cuando tienen que atravesar vías de gran tráfico o se construye una nueva carretera.

² Traducción propia, disponible en <http://www.dft.gov.uk/ha/standards/dmrb/>.

³ "VTPI, 2012, p. 5.13-1.

⁴ Un amplio análisis de las definiciones de este concepto puede encontrarse en Quigley 2011. Visitado el 3 de julio de 2013.

2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN PROPUESTO

2.1. PLANTEAMIENTO GENERAL

Aunque se trata de una investigación genérica sobre la influencia de las vías urbanas rápidas en los desplazamientos peatonales, el estudio se centró en el análisis de unos viajes concretos dentro de las ciudades, los viajes de compras, y en particular aquellos que tienen como destino los mercados tradicionales municipales⁵.

Las razones de esta elección son varias:

- En primer lugar se pretendía investigar la influencia de las vías rápidas en desplazamientos peatonales no obligados, pero recurrentes, dado que se conocían indicios de que su incidencia en los desplazamientos obligados, al trabajo o a la escuela, son menos susceptibles a este tipo de influencias y porque se quería contar con un objeto de investigación, los clientes de los mercados, que conocieran la zona y las opciones de desplazamiento existentes, incluida la existencia de vías rápidas a atravesar.
- En segundo lugar, porque los mercados tradicionales, edificios municipales que alquilan o "conceden" espacios a comerciantes sobre todo del ramo de la alimentación y de hogar, atraen una cantidad importante de peatones a un espacio relativamente reducido donde es fácil, por tanto, contar con una numerosa clientela peatonal concentrada para encuestarla.
- Finalmente, porque en el caso de Madrid, existen en funcionamiento dentro de la trama urbana consolidada un total de 47 mercados municipales minoristas, lo que debiera permitir la elección de algunos que resultaran adecuados para desarrollar sobre ellos la investigación.

Sobre la base de tomar como casos de estudio los desplazamientos peatonales a los mercados municipales de Madrid, el método de investigación empleado es sencillo y se compone de las siguientes etapas metodológicas: en primer lugar, la selección de los casos de estudio, es decir, de los mercados a estudiar; en segundo lugar, el diseño del cuestionario y las técnicas de encuesta; finalmente, el procesamiento de los datos obtenidos mediante las encuestas.

2.2. SELECCIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Para la selección de los mercados a estudiar, se procedió al análisis de los existentes en el municipio de Madrid, cuya información básica está disponible en la página web del Ayuntamiento, y a una primera selección de acuerdo con los siguientes criterios:

- Que estuvieran rodeados de una trama de similar densidad y características básicas por todos sus lados.
- Que no existieran otros mercados en radios inferiores a 1 kilómetro.
- Que en las proximidades del mercado existiera una vía urbana rápida que dividiera el "Hinterland" del mercado a una distancia del propio edificio no superior a los 300 metros.

Los dos primeros criterios se realizaron mediante la información proporcionada por los planos de Madrid y por la información sobre mercados del Ayuntamiento.

El tercero requirió una definición previa de "vía urbana rápida" para poder aplicarlo. Dicha definición se concretó en los

⁵ Ver ficha y contexto investigación en Lamiquiz, 2009, 388-417.



FIGURA 1. Localización de los mercados estudiados en Madrid.

siguientes términos: “calle de cuatro o más carriles, de uno o dos sentidos de circulación, con regulación semafórica de la circulación y los pasos de peatones principales en las proximidades del mercado”.

Con estos criterios se llegó a una preselección de 11 mercados que los cumplían.

De esta selección, se eligieron 4 que representaran distintas zonas de Madrid, localizados en cuatro distritos diferentes, para contar con una cierta variedad de situaciones urbanas de mayor o menor centralidad y de mayor o menor densidad, y con la vía rápida situada muy cerca del mercado, para poder comparar su efecto en desplazamientos de diversa longitud. Entiéndase, no obstante, que con la selección de cuatro casos no se pretendía formar una muestra representativa que permitiera un tratamiento estadístico, sino, más bien, disponer de un número mínimo de casos que evitaran

caer en casos muy especiales y ofrecer una cierta variedad para que el estudio tuviera una mayor base.

Finalmente, se seleccionaron los mercados de Argüelles (al oeste), Chamartín (al noroeste), Santa María de la Cabeza (al sur) y San Isidro (al suroeste), los tres primeros situados dentro de la Almendra central (en el interior del primer cinturón de autopista o M-30) y el cuarto al sur de éste, en el distrito de Carabanchel. Su situación en el plano de Madrid, así como la trama urbana de su entorno puede verse en las Figuras 1, 2 y 3.

2.3. DISEÑO DEL CUESTIONARIO Y TÉCNICA DE ENCUESTA

Debe decirse, en primer lugar que el objetivo de la encuesta era, simplemente, averiguar el lugar del domicilio desde el que venían andando al mercado los clientes, así como la periodicidad aproximada de sus visitas.



FIGURA 2. Mercados de Argüelles y Chamartín y posición de las vías arteriales próximas.

Con este objetivo, el cuestionario quedó compuesto por estas tres preguntas, además de la anotación del sexo y la edad aproximada:

¿Cómo ha venido al mercado?, en qué medio de transporte, cuyo objetivo era identificar los clientes que llega-

ban al mercado a pie, es decir, a los que debía realizarse la encuesta.

¿Desde donde viene?, cuyo objetivo era localizar el origen del desplazamiento.

¿Con qué frecuencia viene?, trataba de explorar la relación entre radio de acción y frecuencia de compra.

Las encuestas se realizaron mediante un entrevistador presente en la puerta del mercado que hacía las preguntas y anotaba las respuestas. Se entrevistaba a una de cada diez, de las personas que entraban en el mercado y, en caso, de entrada en grupo, a una sola persona de cada grupo. Se realizaron entre 160 y 180 encuestas por mercado.

Mercados	Argüelles (distrito de Moncloa Aravaca) Chamartín (distrito de Chamartín) Santa María de la Cabeza (Arganzuela) San Isidro (Carabanchel)
Nº de encuestas	703 en total, entre 165 y 185 por mercado.
Técnica	Aleatoria, uno de cada diez clientes. Entrevistador que pregunta y anota las respuestas.
Día y hora	Laborable entre las 10:00 y las 13:00 horas.
Lugar	A la entrada del mercado.
Cuestionario	3 preguntas con respuesta abierta.

TABLA 1. Ficha técnica de la encuesta en mercados municipales.

3. RESULTADOS

3.1. PROCESADO DE LOS DATOS

El primer tratamiento de las respuestas obtenidas a las preguntas planteadas en las encuestas/entrevistas ha consistido en la localización en un mapa del lugar de procedencia de los clientes del mercado en planos catastrales a escala, diferenciando por capas (en un programa CAD) los clientes según la frecuencia de las visitas al mercado.

Posteriormente, examinando la localización de las entradas a los mercados, se han medido en torno a éstas, si-



FIGURA 3. Mercados de Santa María de la Cabeza y San Isidro y posición de las vías arteriales próximas.

guiendo la línea de las aceras en todos los itinerarios posibles, distancias de 100, 250 y 500 metros, para definir los radios de cobertura del mercado.

Finalmente, se han medido las superficies urbanas incluidas en cada uno de los radios de cobertura, con distinción de la parte localizada a uno y otro lado de la vía urbana rápida que las divide, a efectos de poder analizar las consecuencias de ésta utilizando la densidad de clientes como variable de referencia.

3.2. RADIO DE ACCIÓN DE LOS MERCADOS MUNICIPALES

El primer análisis de los resultados obtenidos, se ha dirigido a conocer el radio de acción o de cobertura de los mercados municipales. Para ello se han contabilizado los orígenes de los desplazamientos con destino al mercado, localizados entre los umbrales de la serie de distancias de 100, 250 y 500 metros desde las puertas de los mercados.

Los resultados obtenidos figuran en la Tabla 2.

Distancias al mercado	Argüelles		Chamartín		San Isidro		Santa María de la Cabeza		Total	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
< 100 m	15	8.1	27	15.2	39	21.9	9	5.5	90	12.8
100–250 m	56	30.4	40	22.5	40	22.5	27	16.6	163	23.2
250–500 m	56	30.4	58	32.5	85	47.7	55	33.7	254	36.1
> 500 m	57	31.1	53	29.8	14	7.9	72	44.2	196	27.9
Total	184	100.0	178	100.0	178	100.0	163	100.0	703	100.0

TABLA 2. Procedencia de los clientes-peatones de los mercados.



FIGURA 4. Mercado de Chamartín: localización de la procedencia de los clientes entrevistados.



FIGURA 5. Mercado de Argüelles: localización de la procedencia de los clientes entrevistados.

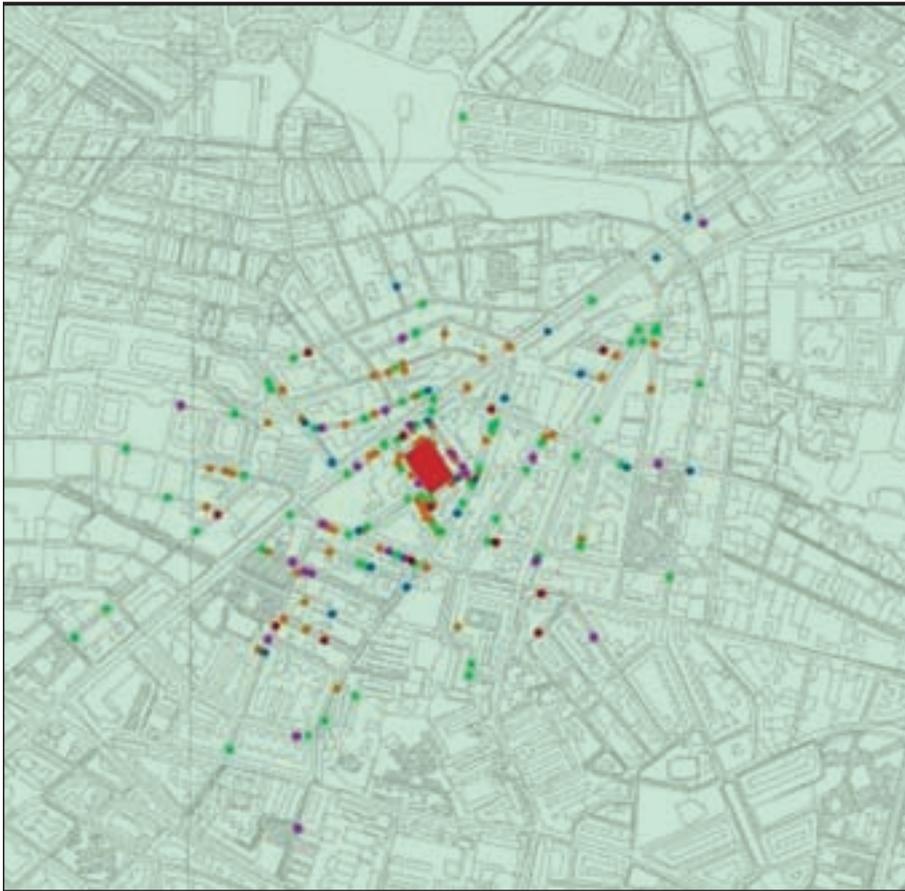


FIGURA 6. Mercado de San Isidro: localización de la procedencia de los clientes entrevistados.



FIGURA 7. Mercado de Santa María de la Cabeza: localización de la procedencia de los clientes entrevistados.

TABLA 3. Recorridos máximos* a pie hacia los mercados.
* Media del 5% de los recorridos más largos, en metros.

Argüelles	Chamartín	San Isidro	Santa María de la Cabeza	Media de los 4 mercados
1428	1187	676	1330	1155

Distancias (m)	1 vez al día		1 vez a la semana		1 vez cada 15 días		1 vez al mes o menos		Total	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
< 100	49	54.4	28	31.1	7	7.8	6	6.7	90	100.0
100-250	68	41.7	62	38.0	19	11.7	14	8.6	163	100.0
250-500	94	37.0	104	40.9	21	8.3	35	13.8	254	100.0
>500	50	25.5	89	45.4	26	13.3	31	15.8	196	100.0
Total	261	37.2	283	40.2	73	10.4	86	12.2	703	100.0

TABLA 4. Frecuencias de viajes y distancias al mercado.

Sobre ellos pueden hacerse las siguientes observaciones:

- Más del 70 % de la clientela peatonal de los mercados municipales tiene su domicilio a menos de 500 metros de éstos. Este porcentaje varía entre los mercados estudiados, desde un mínimo del 55,8 %, en el caso del de Santa María de la Cabeza, hasta un máximo del 92,1 % en el caso del de San Isidro.
- En el radio de los 250 metros del mercado, se sitúa el 35,6 % de la clientela del conjunto de los mercados estudiados, porcentaje que varía desde un mínimo de 22,1% a un máximo del 44,4%, en los mismos mercados.

También se ha extraído la media de las distancias del domicilio de todos los clientes entrevistados. Ello ha arrojado como distancia media del lugar de procedencia a los cuatro mercados de los clientes que se desplazan a pie una cifra en torno a los 350 metros.

Las longitudes máximas de los trayectos realizados por los clientes peatonales de los mercados son considerablemente altas. Así, el 5% de los entrevistados de procedencia más alejada recorren una media de 1.155 metros para desplazarse al mercado. Esta distancia varía sustancialmente de unos mercados a otros, tal como puede verse en la tabla adjunta, alcanzando en el mercado de Argüelles un máximo de 1.428 metros y en el de San Isidro únicamente 676 metros. (Tabla 3).

La Tabla 4 muestra la relación entre la distancia y la frecuencia.

En él puede observarse que:

- Más de la tercera parte, el 37,2%, de todos los clientes que acceden a pie, visitan el mercado a diario. Así lo hacen más del 50% de los residentes en un radio de 100 metros en torno al mercado, más de un 40% de quienes residen entre 100 y 250 metros, y un 37% de los residentes entre 250 y 500 metros. Ello significa, que los mercados constituyen para una parte importante de la población que vive en sus alrededores un lugar de asistencia cotidiano.
- Más del 40 % de todos los clientes visitan el mercado con una frecuencia aproximada de una vez por semana, con porcentajes incluso mayores en los residentes a distancias superiores a los 250 metros del mercado. Estos datos, junto a los anteriores, ilustran la gran fidelidad de la clientela de los mercados municipales.

- Los porcentajes de la frecuentación varían, en general con la distancia, de manera que la frecuentación diaria decae con ella, la semanal aumenta hasta los 500 metros, para luego descender, y el resto va aumentando en función de la distancia.

3.3. LA INFLUENCIA DE LAS VÍAS RÁPIDAS

Como se ha mencionado, para comprobar la influencia de las vías rápidas en los desplazamientos a pie al mercado, se han trazado sobre plano, siguiendo la longitud de las aceras, cuatro umbrales de distancias desde las puertas de los establecimientos seleccionados: menos de 100 metros, entre 100 y 250 metros, entre 250 y 500 metros y más de 500 metros.

Una vez así definidos los ámbitos, se ha procedido a identificar el número de clientes en cada uno de los lados de la vía rápida y a calcular la densidad de éstos referida a la superficie del ámbito correspondiente.

Finalmente, se ha eliminado el umbral inferior a 100 metros, debido a que en dos de los cuatro casos, la vía rápida se encuentra a unos 100 metros del mercado, lo que no permite la existencia de clientes a esta distancia del mercado, al otro lado de la vía rápida.

Los resultados obtenidos con este sistema se presentan en la Tabla 5.

En ella puede verse cómo, para el conjunto de los mercados, la densidad de clientes por hectárea es sensiblemente más alta en el lado del mercado, que en la zona situada al otro lado de la vía rápida en relación al mercado, en porcentajes muy significativos del 290% para el área de cobertura de los 250 metros y del 230% para el área comprendida entre los 250 y los 500 metros.

Si se analizan los resultados por mercados, en todos ellos y en todos los umbrales de distancias, la densidad de clientes al otro lado de la vía rápida es inferior a la densidad del lado del mercado y, en general, con diferencias notables, salvo en el radio de los 250 metros del mercado de Argüelles, donde la diferencia es de un 12,7% siempre a favor del lado del mercado.

Con estos datos, debe decirse que todos los indicios apuntan a que, efectivamente, la presencia de una vía rápida urbana parece influir de forma decisiva en los desplazamientos peatonales, constituyéndose en una barrera capaz de reducir a la tercera parte la afluencia a los mercados, desde el otro lado de la misma.

Mercado	Lado	Menos de 250 m	De 250 a 500 m
Argüelles	Mercado	15.9	6.8
	Opuesto	14.1	2.7
Chamartín	Mercado	21.7	11.4
	Opuesto	5.4	2.8
San Isidro	Mercado	31.4	5.9
	Opuesto	14.4	5.5
S. M. de la Cabeza	Mercado	8.7	4.4
	Opuesto	5.1	2.4
Media 4 mercados	Mercado	18.4	7.7
	Opuesto	6.3	3.3

TABLA 4. Densidad de clientes según situación del domicilio en relación a la vía rápida (en clientes por hectárea).

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, pueden enunciarse las siguientes conclusiones:

- En primer lugar, que el radio de influencia peatonal de los mercados es considerablemente reducido en la mayoría de los casos, si bien hay una proporción significativa de viajes largos, de más de 1 kilómetro:
 - El recorrido medio a pie al mercado se sitúa en torno a los 350 metros, lo que significa que el 50% de la clientela recorre más de esa distancia para acceder al mismo. A subrayar que, con un recorrido de 350 metros, en un trazado reticular, el “Hinterland” abarcado sería de unas 20 Has. En esa superficie residiría el 50% de la clientela.
 - Se han detectado recorridos al mercado superiores a los 1.600 metros, tanto en el mercado de Argüelles, como en el Santa María de la Cabeza, y el percentil del 5% de procedentes más lejanos arroja una media de 1.155 metros, cifras éstas de gran magnitud para desplazamientos peatonales.
- Se observa una gran fidelidad en los clientes peatonales de los mercados municipales:
 - Más de un 37% de los entrevistados los visita todos días y más de un 77% lo hace una o más veces por semana.
 - Como era lógico esperar la frecuencia de las visitas desciende con la distancia.
- Sobre el objetivo principal de la investigación, los resultados parecen avalar que las vías rápidas, en general, y todas las consideradas, en particular, actúan como barreras a los desplazamientos peatonales opcionales, provocando descensos muy relevantes en la clientela potencial de estos, al otro lado de las mismas.

El descenso relativo de la clientela no se debe al aumento real de la distancia que provoca la presencia de la vía, sino a factores de otro tipo, probablemente psicológicos, que afectan a la decisión del usuario. Los mismos estarían relacionados con los retrasos, la falta de confort y las dificultades de acceso que el tráfico vehicular impone a los modos no motorizados, es decir, con la definición que VTPI (2012) daba del “efecto barrera”. Según la distinción que establece este mismo instituto, se trataría más de un efecto barrera causado por el aumento de los flujos vehiculares que de una verdadera ruptura urbana (“severance”), que asocia a la construcción o ampliación de vías urbanas. Se puede suponer que este tipo de efecto esté relacionado

tanto con los desvíos que imponen este tipo de vías como con la sensación de inseguridad que transmiten para el usuario vulnerable, especialmente si se tiene en cuenta el perfil de cliente de los mercados, en buena parte personas de una cierta edad.

Por tanto, en relación a la hipótesis, puede considerarse comprobada la deformación que introducen en el “Hinterland” peatonal de determinados establecimientos comerciales las vías rápidas urbanas y que esta deformación no se debe a los aumentos de distancia que provocan sino, probablemente, a los efectos psicológicos que provocan en el peatón.

5. REFERENCIAS

- Antonini, G., Bierlaire, M. & Weber, M. (2006). Discrete choice models of pedestrian walking behavior. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(8), 667- 687.
- Appleyard, D. (1981). *Livable streets*. Berkeley: University of California Press.
- Blue, V. J. & Adler, J. L. (2000). Modeling four-directional pedestrian flows. *Journal of the Transportation Research Board*, 1710, 20-27.
- Bradbury, A., Tomlinson, P. and Millington, A., 2007. Understanding the evolution of community severance and its consequences on mobility and social cohesion over the past century, In *Proceedings of the European Transport Conference (ETC-2007)*, Noordwijkerhout, October 2007, The Netherlands. Available in <http://etcproceedings.org/paper/understanding-the-evolution-of-community-severance-and-its-consequences-on-mob>. [visitado 10 septiembre 2012].
- Cervero, R & Kockelman, K. (1997). Travel demand and the 3Ds: Density, diversity, and design. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2(3), 199-219.
- Clark, J.M. and Hutton B.J. (1991). *The appraisal of community severance*. Contractor Report 135. Berkshire, England: Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport.
- Grigg, A. O., and Ford, W. G. (1983) *Review of some effects of major roads on urban communities*, TRRL Supplementary Report 778, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne.
- Daamen, W. & Hoogendoorn, S. P. (2003). Experimental research of pedestrian walking behavior. *Journal of the Transportation Research Record*, 1828, 20-30.
- Dabbs, J. M. & Stokes, N. A. (1975). Beauty is power: the use of space on the sidewalk. *Sociometry*, 38(4), 551-557.
- DRD (1992), *Evaluation of Highway Investment Projects (undersøgelse af store hovedlandevejsarbejder. Metode for effektberegninger og økonomisk vurdering)*, Danish Road Directorate.

- Dapper, F., Prestes, E., Idiart, M. A. P. & Nedel, L. P. (2006): Simulating pedestrian behavior with potential fields. *Advances in Computer Graphics, Lecture Notes in Computer Science*, 4035, 324-335.
- Dixon, L. B. (1996). Bicycle and pedestrian level-of-service performance measures and standards for congestion management systems. *Journal of the Transportation Research Record*, 1538, 1-9.
- Ewing, R. & Cervero, R. (2001). Travel and the built environment: A synthesis. *Journal of the Transportation Research Record* 1780. 87-114.
- Fleig, P. H. & Duffy, D. J. (1967). A study of pedestrian safety behavior using activity sampling. *Traffic Safety Research Review*, 11(4), 106-111.
- Glampson, A., Glastonbury, B. & Fruin D. (1977). Knowledge and perceptions of the social services. *Journal of Social Policy*, 6(1), 1-16.
- Gehl, J. (1971 Danish 1 st Ed., 1987 for English 1st Ed.). *Life between buildings: using public space*. Copenhagen: Danish Architectural Press.
- Goldschmidt, J. (1977). Pedestrian delay and traffic management. *Transport and Road Research Laboratory*, Crowthorne, Berkshire: Transport and Road Research Laboratory.
- Guo, X, Black, J, Dunne, M. (2001): Crossing pedestrians and dynamic severance on urban main roads. *Road & Transport Research*, Sep 2001.
- Handy, S.; Clifton, K. (2001): "Local Shopping as a Strategy for Reducing Automobile Travel" *Transportation*, Vol. 28, No. 4, pp. 317-346. Handy, S., 2002. *Amenity and Severance*. Oxford: Elsevier Science.
- Handy, S. (2005). Critical assessment of the literature on the relationships among transportation, land use, and physical activity. Does the built environment influence physical activity? Examining the evidence. *Transportation Research Board Special Report*, 282.
- Harrell, W. A. (1991): Factors influencing pedestrian cautiousness in crossing streets. *The Journal of Social Psychology*, 131(3), 367-372.
- Helbing, D. & Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, 51, 4282-4286.
- Helbing, D. (1998). *Model for pedestrian behavior*. Natural structures. Principles, Strategies, and Models in Architecture and Nature, Part II, 93-98.
- Highway Capacity Manual (2000). Transportation Research Board. Washington, D.C.: National Research Council.
- Hoogendoorn, S. P. (2007). Pedestrian flow modeling by adaptive control. *Journal of the Transportation Research Board*, 1878, 95-103.
- Hoogendoorn, S. P. & Daamen, W. (2005). Pedestrian behavior at bottlenecks. *Transportation Science*, 39(2), 147-159.
- Jacobs, J. (1961). *The life and death of great American cities*. New York: Random House.
- Jacobsen, P.; Racioppi, J.; Rutter, H. (2009), "Who Owns The Roads? How Motorised Traffic Discourages Walking And Bicycling," *Injury Prevention*, Vol. 15, Issue 6, pp. 369-373; <http://injuryprevention.bmj.com/content/15/6/369.full.html>. [visitado 10 septiembre 2012].
- Kukla, A. (2001). *Methods of theoretical psychology*. Massachusetts: MIT Press.
- Lamíquiz, F.; Pozueta, J. (Dir.); Porto, M. (2009): *La Ciudad Peaseable. Recomendaciones para un planeamiento, un diseño urbano y una arquitectura considerada con los peatones* CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid
- Lee, T. and Tagg, S., (1976). The social severance effects of major urban roads. In: Stringer P. and Wenzel H, ed. *Transportation Planning for a Better Environment*. New York: Plenum, 267-281.
- Lefkowitz, M., Blake, R. R. & Mouton, J. S. (1955). Status factors in pedestrian violation of traffic signals. *The Journal of Abnormal and Social Psychology*, 51(3), 704-706.
- Mayne, A. J. (1954). Some further results in the theory of pedestrians and road traffic. *Biometrika*, 41(3/4), 375-389.
- Older, S. J. (1968). Movement of pedestrians on footways in shopping streets. *Traffic Engineering and Control*, 10, 160-163.
- Osagari, T. (2004). *Modeling of pedestrian behavior and its applications to spatial evaluation*. AAMAS'4: Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systemes, 2. Washington, DC: IEEE Computer Society.
- Pushkarev, B. (1975). *Urban space for pedestrians*. Massachusetts: MIT Press.
- Quigley, R.; Thornley, L. (2011): Literature Review on Community Cohesion and Community Severance: Definitions and Indicators for Transport Planning and Monitoring. Report to New Zealand Transport Agency. Quigley and Watts Ltd.
- Rappaport, A. (1987). Pedestrian Street Use: Culture and Perception. In *Public Streets for Public Use*, A. V. Moudon, Eds. New York: Columbia University Press.
- Rintoul, D. (1995): *Social Cost of Transverse Barrier Effects*, Planning Services Branch, B.C. Ministry of Transportation and Highways. Available in www.gov.bc.ca/tran [visitado 10 septiembre 2012].
- Russell, J.; Hine, J. (1996), "Impact of Traffic on Pedestrian Behaviour; Measuring the Traffic Barrier," *Traffic Engineering and Control*, Vol. 37, No. 1 (), Jan. 1996, pp. 16-19. Available in, www.tecmagazine.com [visitado 10 septiembre 2012].
- Sælensminde, K. (1992), *Environmental Costs Caused by Road Traffic in Urban Areas- Results from Previous Studies*, Institute for Transport Economics, Oslo. Available in www.toi.no [visitado 10 septiembre 2012].
- Stanley, J.; Rattray, A. (1978): "Social Severance" in *The Valuation of Social Cost*, Allen and Unwin; B.S. Hoyle and R.D. Knowles, Modern Transport Geography, Belhaven Press (London), p. 62.
- SNRA (1986), *Investment in Roads and Streets*, publication 1986:15E, Swedish National Road Administration. Available in www.vv.se [visitado 10 septiembre 2012].
- Tate, F. (1997): *Social Severance*, Report No. 80, Transfund New Zealand.
- Tanner, J. C. (1951). The delay to pedestrians crossing a road. *Biometrika*, 38(3/4), 383-392.
- Tirachini, A. (2011), *Effects Of Pedestrian Mobility Barriers On Walking Distance*, Institute of Transport and Logistics Studies. Available in www.sydney.edu.au [visitado 10 septiembre 2012].
- Turner, A. & Penn, A. (2002). Encoding natural movement as an agent-based system: an investigation into human pedestrian behavior in the built environment. *Environment and Planning B, Planning and Design*, 29, 473-490.
- Wakim, C. F., Capperon, S. & Oksman, J. (2004). A Markovian model of pedestrian behavior. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE International Conference*, 4, 4028-4033.
- Whyte, W. H. (1980). *The Social Life of Small Urban Spaces*. New York, NY: Projects for Public Spaces.
- Whyte, W. H. (1988). *City: Rediscovering the Center*. New York: Doubleday.
- Wolff, M. (1973). Notes on the behaviour of pedestrians. In *People in Places: The Sociology of the Familiar*, A. Birenbaum and E. Sagar, Eds. New York: Praeger, 35.48.
- VTPI (2012): *Transportation Cost and Benefit Analysis II- Barrier Effect (5.1.3)*. Victoria Transport Policy Institute. Available in www.vtpi.org/tca/tca0513.pdf [visitado 10 septiembre 2012].

Resistencia a tracción de fibras de henequén (*Agave fourcroydes* Lemaire) impregnadas con sustancias hidrófobas en medio alcalino

MAGALI TORRES FUENTES (*) y LISET LEÓN CONSUEGRA (**)

RESUMEN Un gran número de investigaciones se ha desarrollado desde el pasado siglo para comprender el mecanismo de degradación de las fibras lignocelulósicas empleadas en el refuerzo del cemento. La descomposición de la fibra ocurre cuando los constituyentes, principalmente la lignina y las hemicelulosas presentes en la lámina media, reaccionan con el agua con pH alcalino contenida en los poros del hormigón, rompiendo la unión entre las células individuales de las fibras. Para evitar este deterioro, se han propuesto algunas soluciones. Entre ellas está la protección de las fibras con sustancias hidrófobas. Se estudia, en condiciones de laboratorio, la protección de las fibras de henequén (*Agave fourcroydes* Lemaire) con las sustancias hidrófobas presentes en subproductos industriales, como mezcla cera/resina de caña de azúcar, variando el pH desde 10 hasta 13 de las disoluciones buffer donde están sumergidas. Los resultados obtenidos mostraron que las fibras sin impregnar se colorean de amarillo intenso en las disoluciones de pH entre 10 y 13 y que esto no necesariamente conduce a una reducción de la resistencia a tracción y que la misma en las fibras de henequén sin impregnar (testigo) e impregnadas con cera/resina (10/90) disminuye hasta 180 días. Cuando las fibras de henequén están impregnadas la disminución de la resistencia a tracción respecto a las fibras sin impregnar se justifica por la rigidez del recubrimiento, sin embargo, la impregnación detiene la descomposición biológica de las fibras.

TENSILE STRENGTH HENEQUEN FIBRES (*AGAVE FOURCROYDES LEMAIRE*) TREATED WITH HYDROPHOBIC SUBSTANCES IN ALKALINE MEDIUM

ABSTRACT A lot of research has been developed in the past century to understand the mechanism of degradation of lignocellulosic fibers used in reinforcing fiber concrete. The decomposition occurs when the constituents, especially lignin and hemicelluloses present in the middle lamella, react with water with alkaline pH contained in the pores of the concrete, breaking the connection between individual cells of the fibers. To prevent this deterioration, some solutions have been proposed. Among them is the protection of the hydrophobic fibers. Is studied in laboratory conditions, protection of henequen fibers (*Agave fourcroydes* Lemaire) with hydrophobic substances present in industrial byproducts such as wax mixture/resin sugarcane, changing the pH from 10 to 13 of the buffer solutions where they are immersed. The results showed that the unimpregnated fibers are colored bright yellow in solutions of pH between 10 and 13 and that this does not necessarily lead to a reduction in tensile strength and at the same henequen fibers unimpregnated (control) and impregnated with wax/resin (10/90) decreases up to 180 days. When henequens fibers are impregnated decreased tensile strength with respect to the unimpregnated fibers are justified by the rigidity of the coating, however, the biological decomposition stops impregnation of the fibers.

Palabras clave: Refuerzo del cemento, Protección, Fibras vegetales, Resistencia a tracción.

Keywords: Cement reinforcement, Protection, Plant fibers, Tensile strength.

(*) Dr. C. Profesora Titular. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Zaragoza 8506 entre Medio y Río. Matanzas. Cuba.
E-mail: magali.torres@umcc.cu.

(**) Ing. Profesora Instructora. Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos".
E-mail: liset.leon@umcc.cu.

1. INTRODUCCIÓN

Por su bajo costo, en los países en vías de desarrollo, las fibras vegetales se emplean en diversos elementos de construcción. Se destacan, en este sentido, países como Brasil, Tanzania y México. Sin embargo, las fibras vegetales en el medio alcalino del cemento, se degradan lo que constituye una dificultad para su empleo.

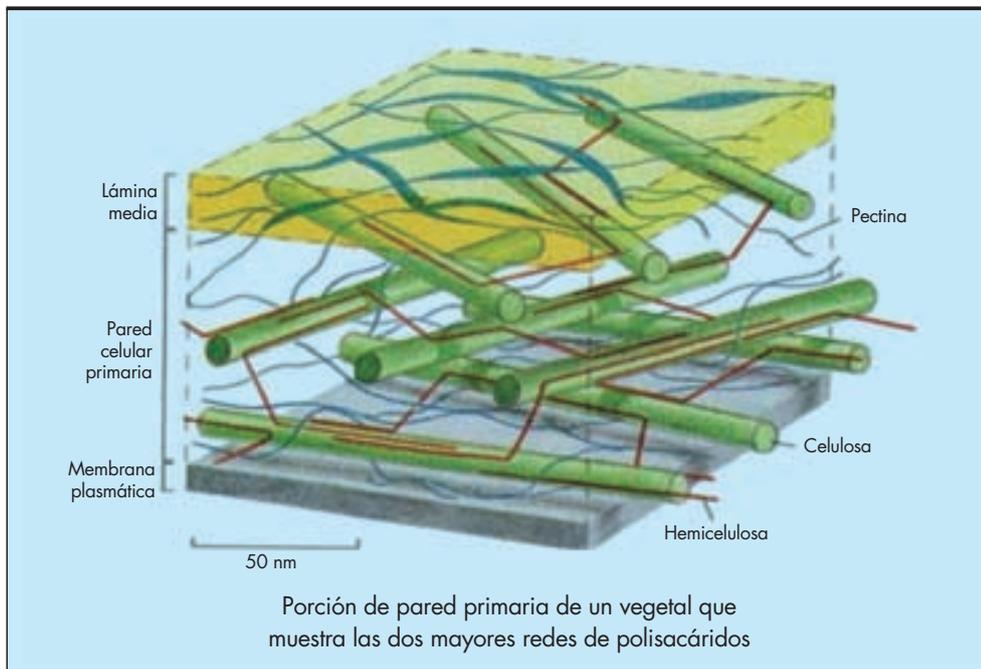


FIGURA 1. Estructura de la pared celular en la fibra vegetal.

Las células de las fibras vegetales tienen de 10 a 25 micrómetros de diámetro, y están compuestas por 4 capas de microfibrillas, las cuales son ricas en celulosa y están aglomeradas por hemicelulosa (Coutts, 1992). (Figura 1).

Shimizu y Jorrillo (1992) analizaron detalladamente la estructura de las fibras de coco y afirmaron que cada una de ellas puede contener desde 30 hasta más de 200 células individuales. Estos investigadores encontraron la presencia de protuberancias en la superficie lateral de las fibras de diámetro entre 8 y 15 micrómetros que pueden incrementar la adherencia con matrices frágiles.

La celulosa, (Figura 2) es un homopolímero de la D-glucosa, el cual forma cadenas de grado de polimerización superior a $n \geq 1.000$ ($C_6H_{10}O_5$) $_n$, unidas entre sí por enlaces glicosídicos e interacciones electrostáticas que forman supramoléculas. Es el principal componente de la pared celular y en la naturaleza su forma más pura está en la fibra del algodón. Su masa molecular oscila en el rango de 150.000-350.000 g/mol.

La lignina no es una sustancia individual, sino una mezcla de polímeros aromáticos. No presenta una estructura regular y sus unidades estructurales están unidas por distintos tipos de enlaces, lo que la diferencia de otros biopolímeros como los polisacáridos y proteínas. Aunque muchos aspectos de la química de la lignina aún no se conocen completamente, los prin-

cipales elementos estructurales han sido esclarecidos como resultado de estudios detallados de preparaciones de lignina aislada. (Figura 3).

La hemicelulosa está constituida por diversos polisacáridos. El nombre de hemicelulosas fue empleado por primera vez en 1891 por Schulze para designar los polisacáridos extraíbles de las plantas con disoluciones alcalinas diluidas, y que en aquella época fueron considerados como un intermediario en el proceso biosintético de la celulosa, al encontrarse estrechamente vinculadas a esta en la pared celular. Son extraíbles con agua o disoluciones alcalinas, de bajo grado de polimerización y de mayor accesibilidad y reactividad que la celulosa.

Se han reportado enlaces químicos entre la lignina y prácticamente todos los componentes de las hemicelulosas. También existen enlaces entre la lignina y la celulosa. El tipo de esos enlaces es variado. Pueden ser de tipo éster, éter, o incluso glicosídico (Martín, 2002). Las uniones éster son fácilmente hidrolizadas por los álcalis. Las uniones éter entre la lignina y los carbohidratos son mucho más estables. (Figura 4).

En la Universidad de Matanzas, Cuba, se investiga el comportamiento de las fibras vegetales de henequén en la matriz cementicia, con el objetivo fundamental de elevar su durabilidad mediante el empleo de subproductos industriales como la cera y la resina de caña de azúcar, como protectores.

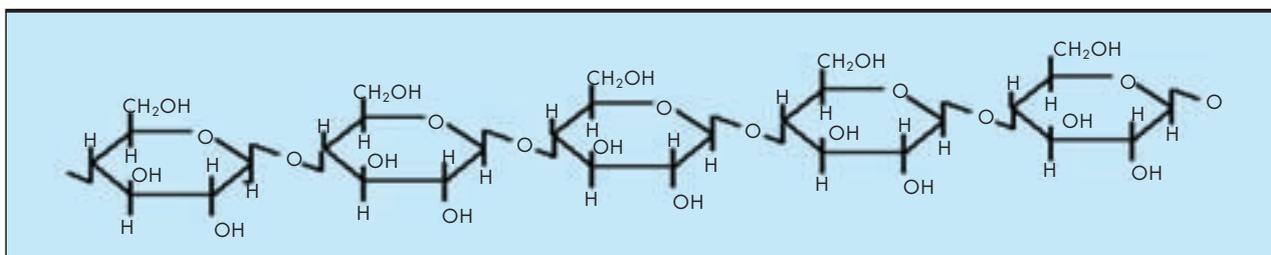


FIGURA 2. Estructura de la celulosa.

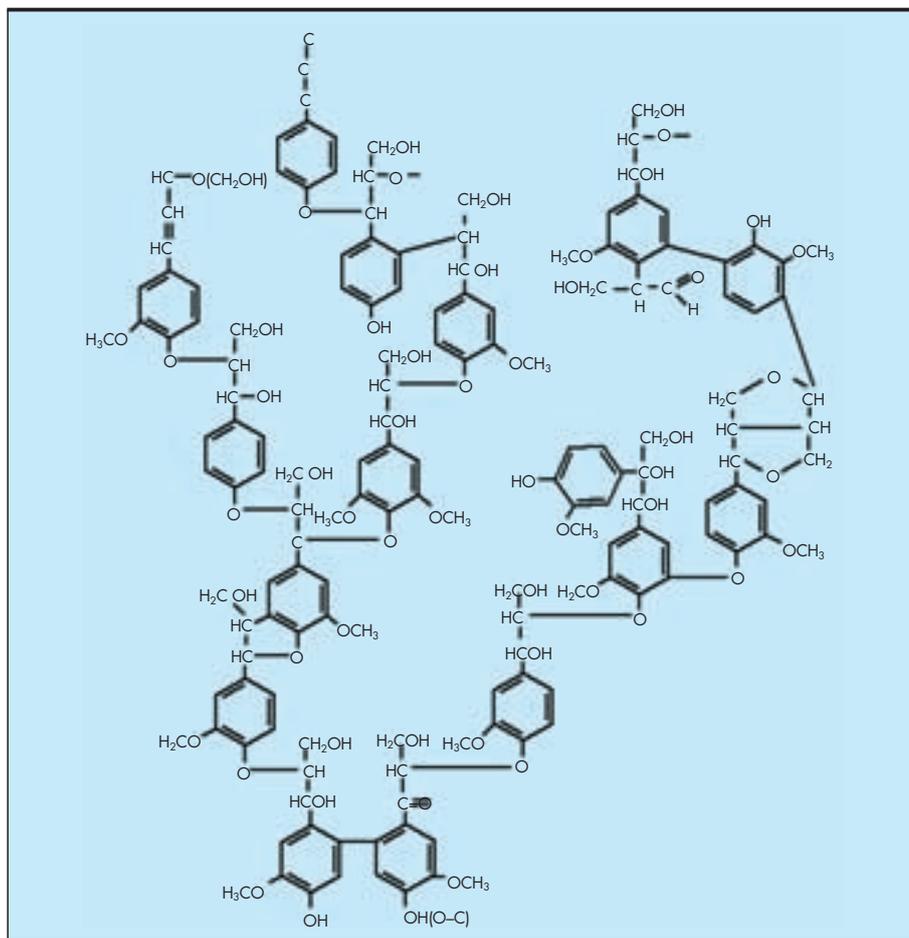


FIGURA 3. Estructura de la lignina.

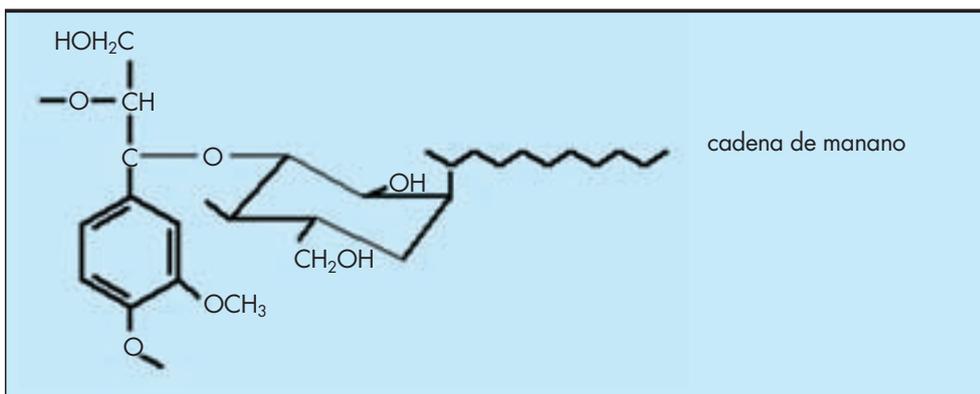


FIGURA 4. Lignina unida a carbohidrato por enlace éter.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se agruparon fibras vegetales de *Agave fourcroydes* Lemaire, Clase D, provenientes de la Empresa Henequenera "Eladio Hernández" de Matanzas en ocho mazos, de 20 gramos cada uno: m1, m2, m3, m4, m5, m6, m7 y m8. La longitud de las fibras se mantuvo en 19 mm, luego de desechar los extremos tomando como referencia los trabajos hechos por Macías (1993 b) con el Fibrequén. Los mazos fueron llevados a peso constante, mediante el calentamiento a 50°C en una estufa Memmert, durante 24 horas.

La disolución impregnadora estuvo constituida por 6,3 g (10%) de cera y 56,7 g (90%) de resina en 250 mL de xileno [$C_6H_4(CH_3)_2$] y presentó un color marrón.

Los mazos m1, m2, m3 y m4, para cada tiempo de experimentación, fueron tomados como testigos y almacenados en una desecadora, utilizando como sustancia adsorbente ácido sulfúrico concentrado, hasta su empleo. Los mazos m4, m5, m6, m7 y m8, igualmente, para cada tiempo de experimentación, fueron sumergidos en la disolución impregnadora durante 15 minutos, manteniendo la temperatura a 60°C. Des-

Testigo (fibras sin impregnar)				
Días	pH 10,3	pH 11,5	pH 12,1	pH 13,0
28	7,9	6,0	5,7	13,0
45	7,7	6,9	6,2	12,4
90	5,4	7,4	5,4	13,4
180	9,1	7,4	8,3	13,1
Muestra (fibras impregnadas con cera/resina 10/90)				
Días	pH 10,3	pH 11,5	pH 12,1	pH 13,0
28	7,5	6,8	6,6	12,9
45	7,6	6,8	6,5	12,3
90	8,1	5,8	6,2	13,1
180	7,0	7,1	7,1	13,3

TABLA 1. Valores medios del pH de disoluciones con fibras de henequén sin impregnar e impregnadas con mezcla cera/resina de caña de azúcar (10/90) en el tiempo.

pués de este tiempo, se secaron a temperatura ambiente sobre papel de filtro durante 24 horas. (Gram, 1983).

Con el objetivo de simular el medio cementicio se prepararon disoluciones buffer de valores de pH 10,3; 11,5; 12,1 y 13,0 como se muestra a continuación:

- Buffer 10,3: obtenido con 500 mL de disolución 0,05 mol/L de NaHCO_3 (bicarbonato de sodio) + 107 mL de disolución 0,1 mol/L de NaOH (hidróxido de sodio).
- Buffer 11,5: obtenido con 500 mL de disolución 0,05 mol/L de NaHPO_4 (fosfato monobásico de sodio) + 41 mL de disolución 0,1 mol/L de NaOH (hidróxido de sodio).
- Buffer 12,1: obtenido con 250 mL de disolución 0,2 mol/L de KCl + 60 mL de disolución 0,2 mol/L de NaOH (hidróxido de sodio).
- Buffer 13,0: obtenido con 1,3 g de CaO (óxido de calcio) en 250 mL de agua destilada.

Todos los mazos fueron sumergidos en cada disolución de pH durante el tiempo planificado (28, 45, 90 y 180 días), a temperatura ambiente. Finalizado cada período de tiempo fueron extraídas 10 fibras, al azar, las cuales fueron secadas a

temperatura ambiente, sobre papel de filtro, durante 24 horas. Posteriormente, se determinó la resistencia a la tracción mediante un equipo MESDAN.

Con el objetivo de determinar las variaciones de pH, se tomaron alícuotas de 10 mL de cada disolución que contenía a cada mazo de fibras y se le determinó el pH al final de cada tiempo de experimentación.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En todas las disoluciones buffer que contenían las fibras sin impregnar (testigos) y fibras impregnadas (muestras) se observó una disminución de los valores de pH, desde el tiempo cero, considerando este el día que se comenzó el experimento. (Tabla 1).

Esta disminución en la caída de los valores de pH se pudo deber a que en la hidrólisis básica de la celulosa se liberan al medio acuoso compuestos ácidos como los ácidos acético, láctico, treónico, fórmico, etc., (Glauss, 1999) los que constituyen el carbono orgánico disuelto debido a la formación de las lactonas del ácido isosacarínico. (Figura 5).

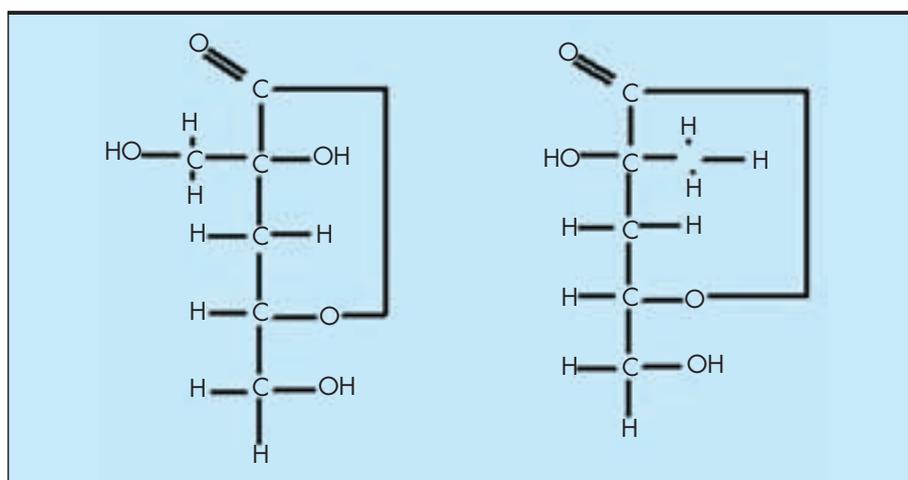


FIGURA 5. Estructura de las lactonas del ácido isosacarínico.



FIGURA 6. Crecimiento de *Aspergillus niger* sobre Agar czapek modificado.

A los 28 días se observó, en las superficies de las disoluciones buffer que contenían las fibras testigo (sin impregnar) y las fibras impregnadas (muestras), la presencia de una masa oscura que, después de sembrada en medios de cultivo, fue identificada como perteneciente al moho *Aspergillus niger*. (Figura 6). Las fibras, en algunas partes, presentaron manchas de color negro, que se intensificaron con el tiempo. Estos resultados evidenciaron la presencia de microorganismos que pudieron actuar sobre las fibras a través de un mecanismo de biodeterioro.

Las fibras testigo sumergidas en las disoluciones buffer de pH 10, 11 y 12 mostraron un color amarillo tenue, mientras que las que se encontraban en pH 13,0 se colorearon de un amarillo intenso. Las fibras muestras (impregnadas) mantuvieron el color de la sustancia impregnadora. Las impregnadas con mezcla de cera/resina (10/90) hasta 180 días en diferentes disoluciones buffer de pH, conservaron también el color de la mezcla impregnadora, lo que indicó que la impregnación evitó la reacción de los componentes químicos de las disoluciones buffer con la lignina de la fibra de henequén. Además, no se observó el ennegrecimiento en partes de las fibras, indicador de la protección contra el biodeterioro de las mismas. Resulta posible que el amarillamiento de las fibras haya ocurrido por la ruptura de los enlaces de la lignina y de esta y los carbohidratos componentes de las hemicelulosas, con la liberación de polifenoles que se transforman en compuestos oxidados, como las quinonas (para quinonas), que son de color amarillo, lo que pudiera provocar un cambio en la composición química de la disolución. También deben ocurrir cambios en la estructura de la celulosa.

Rastislav *et al.* (1989) estudiaron la celulosa del bagazo sometida a tratamientos alcalinos y demostraron que existe una elevada sensibilidad a los cambios estructurales. Ocurren cambios en el sistema de puentes de hidrógeno intra e intermoleculares los que estabilizan los estados conformacionales típicos de los grupos hidroximetilos y de los grupos hidroxilos en carbono secundario, así como, la forma de la cadena de la macromolécula después de la modificación. Esta transición ocurre cuando se destruyen las zonas de elevado ordenamiento (cristalinas) de la celulosa, apareciendo otras nuevas por la modificación. En resumen, primero ocurre la transición prácticamente completa en el nivel conformacional-molecular y después ocurre la transición completa al nivel de organización supramolecular tridimensional.

Estos mecanismos ocurren de forma simultánea cuando las fibras están en contacto directo con el cemento, pues todos los iones están presentes, los cuales tienen diferente actividad iónica y radio iónico, además, la incidencia de los diferentes compuestos sobre las fibras depende de su producto de solubilidad.

Cuando las fibras se almacenan en condiciones de laboratorio, en disoluciones de diferentes buffer de pH, estas no contienen todos los iones que presenta el cemento real. Gram (1983) señaló que los diferentes iones inflúan de forma diferente en el mecanismo de degradación de las fibras. A pH 13, tanto para la disolución que contiene el testigo como la que contiene la muestra, ocurre estabilización del medio por la interacción entre las sustancias componentes de la disolución y de las fibras. Además, se debe destacar que en el caso de las muestras la variación de pH es menor en el tiempo. La composición de la disolución buffer 13, es diferente al resto de las disoluciones. Está formada por óxido de calcio (CaO) que al disolverse en el agua forma el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de calcio).

Es posible que el ion calcio en la disolución de CaO tenga efectos diferentes en la descomposición de las fibras que los iones potasio (K^+) y sodio (Na^+). Para una disolución diluida cada ion está en un campo magnético, sometido a las cargas de los demás iones en disolución. La contribución de cada ion se expresa por su coeficiente de actividad y es función de su valencia y de la temperatura. Otro factor que pudiera influir es el radio atómico del ion en cuestión y el producto de solubilidad de los compuestos. Entre estos efectos es necesario considerar el producto de solubilidad y la fuerza iónica. En resumen todos estos factores pueden influir en el comportamiento de las fibras.

Se determinó la resistencia a tracción de las fibras sin impregnar e impregnadas. Los datos aparecen en Tabla 2.

La resistencia a tracción de las fibras sin impregnar (testigo) y las impregnadas con la mezcla cera/resina de caña de azúcar (10/90) (muestra) disminuye en el tiempo. Puede observarse que alcanza su valor mínimo a los 180 días, en disoluciones buffer con pH entre 10 y 13. Las fibras muestras, a los 180 días, tienen un valor menor respecto a los testigos. Este comportamiento pudiera deberse a que el recubrimiento es rígido y está adherido a la superficie de la fibra, lo que dificulta su elasticidad.

4. CONCLUSIONES

1. La coloración amarilla de las fibras de henequén en una disolución de pH entre 10 y 13 no necesariamente conduce a una reducción de la resistencia a la tracción.
2. La resistencia a la tracción de las fibras de henequén sin impregnar (testigo) e impregnadas con cera/resina de caña de azúcar (10/90) disminuye a partir de 90 días siendo menor la misma a los 180, cuando están almacenadas en disoluciones buffer de pH entre 10 y 13.
3. La impregnación de fibras de henequén con mezcla cera/resina de caña de azúcar (10/90) detiene la descomposición microbiológica de las mismas al estar sumergidas en disoluciones buffer con pH entre 10 y 13 durante 180 días.
4. Cuando las fibras de henequén están impregnadas con la mezcla cera/resina de caña de azúcar (10/90) disminuye la resistencia a tracción respecto a las fibras sin impregnar debido a la rigidez del recubrimiento.

Testigo (fibras sin impregnar)				
pH	28 días	45 días	90 días	180 días
10,3	5,4	7,5	1,5	1,0
11,5	6,5	5,8	3,0	1,9
12,1	6,8	4,9	2,9	1,6
13,0	7,1	8,2	4,8	4,2
Muestra (fibras impregnadas con cera/resina 10/90)				
pH	28 días	45 días	90 días	180 días
10,3	6,8	9,3	3,6	3,0
11,5	6,4	10,3	4,6	2,1
12,1	4,6	6,0	2,3	1,3
13,0	6,6	5,6	3,9	2,7

TABLA 2. Valores medios de resistencia a tracción de fibras de henequén sin impregnar e impregnadas con cera/resina de caña de azúcar (10/90).

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BIDLACK, J., MALONE, M., BENSON R. (1992). Molecular structure and component integration of secondary cell walls in plants. *Proc. Okla. Acad. Sci.*, 72(s/n): 51-56.
- COUTTS, R. S. P. (1992). From forest to factory to fabrication. En: International Symposium on Fibre Reinforced Cement and Concrete. Sheffield. London: E&FN Spon, 1992. (RILEM Proceeding, 17).
- GLAUS, M. A., VAN LOON, L. R., ACHATZ, S., CHODURA, A., FISCHER, K. (1999). Degradation of cellulosic materials under the alkaline conditions of a cementitious repository for low and intermediate level radioactive waste. Part 1: Identification of degradation products. *Analytica Chimica acta*, (398): 111-122.
- GRAM, H. E. (1983). Durability of natural fabrics in concrete. Stockholm/Sweden Cement and Concrete. Research Institute. 255 p.
- MARTÍN, C. (2002). Estudio de la inhibición de la fermentación de hidrolizados de bagazo de caña de azúcar para la producción de etanol. Matanzas. 136 h. Tesis (en opción al grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas). Departamento de Química e Ingeniería Química. Universidad de Matanzas, Cuba.
- RASTISLAV G., ZHBANKOV, SOCARRÁS A., STANISLAV P. F., QUINTELA, O., TEEIAER R. E. (1989) Estudio de los cambios estructurales sufridos por la celulosa del bagazo sometida a tratamientos alcalinos. *Revista ICIDCA*. XXIII (1): p. 52-55.
- SHIMIZU, G., JORRILLO P. (1992). Coir fiber reinforced cement-based composite. Part 1: microstructure and properties of fiber-mortar. En: International Symposium on Fiber Reinforced Cement and Concrete, Organizado por RILEM (The International Union of Testing and research laboratories for Materials and Structures (4., Sheffield, 1992).. London: E&FN Spon., p. 1080-95.

Modelación estocástica en problemas de ingeniería geotécnica. Aplicación al diseño geotécnico de cimentaciones superficiales en suelos friccionales

ARMANDO JESÚS MARTÍNEZ RODRÍGUEZ (*) y GILBERTO QUEVEDO SOTOLONGO (**)

RESUMEN Se presenta la modelación de problemas de ingeniería geotécnica, a través del diseño de una metodología que pretende insertar un nuevo enfoque en la solución de cualquier problema ingenieril, en este caso sobre bases probabilísticas. Se trata de la simulación estocástica empleando el método de Monte Carlo. El citado proceso parte de la definición del problema, caracteriza estadísticamente las variables aleatorias incidentes y analiza la dependencia o no entre las mismas. Posteriormente se aplica un mecanismo de generación aleatoria para aquellas variables que fueron consideradas aleatorias, se comprueba la citada aleatoriedad y se repite este proceso hasta lograr una muestra estadísticamente representativa. Este proceso se ha llevado a cabo en un problema clásico de cálculo de capacidad de carga de una cimentación corrida apoyada en un suelo puramente friccional.

Por último se llega a obtener, luego de definir el procedimiento de obtención del ancho de la cimentación, resultados adecuados en la determinación de la probabilidad de falla de la estructura. De esta manera queda definido un nuevo enfoque a favor del diseño de estructuras de acuerdo a criterios de seguridad, en el cual se obtiene una seguridad de diseño numéricamente igual a la seguridad requerida.

STOCHASTIC MODELLING IN GEOTECHNICAL ENGINEERING PROBLEMS. APPLICATION TO GEOTECHNICAL DESIGN IN FRICTIONAL SOILS

ABSTRACT *Modeling of geotechnical engineering problems is carry out, through the design of a methodology, which inserts a new approach in the solution of any engineering problem, in this case, taking probabilistic basis such as the stochastic simulation, using Monte Carlo's Method. This process starting by defining the problem and the statistical characterization of all incident variables, it is analyzes the dependence between them, besides.*

Later, it is applied a mechanism of random generation for those variables that were considered under this approach, it is also proven its randomness and the process will be repeated until achieving a statistically representative sample. This methodology has been performed in a classic problem of load - bearing capacity of a strip footing, in purely frictional soils.

Finally, after defining the procedure of obtaining the width of footing b, it is obtained appropriate results in the determined structure probability failure. By this way, it is being defined a new approach for designing structures according to safety procedures; it is mean that the obtained design safety must be equal to the required safety.

Palabras clave: Modelación estocástica, Simulación, Variable aleatoria, Muestreo de variables, Generación aleatoria, Capacidad de carga, Probabilidad de falla.

Keywords: Stochastic modeling, Simulation, Random variable, Variable sampling, Random generation, Bearing capacity, Failure probability.

(*) Dr. Sc. Ing. Empresa de Diseño y Servicios de Ingeniería. MINAL. Villa Clara. Carretera central, # 212, entre Danielito y Jesús Menéndez. Reparto Virginia. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. C.P. 54 100. E-mail: armandojesus72@yahoo.es

(**) Dr. Sc. Ing. Universidad Central de Las Villas. Centro de Investigación y Desarrollo de las Estructuras y los Materiales (CIDEM). Santa Clara, Villa Clara, Cuba. Carretera a Camajuán Km. 5 1/2 Santa Clara, Villa Clara, Cuba. C.P. 54830. E-mail: quevedo@uclv.edu.cu

1. INTRODUCCIÓN

El auge acelerado de los recursos y las técnicas computacionales ha permitido procesar gran cantidad de datos en breves períodos de tiempo. Esta situación ha venido ocurriendo conjuntamente con una disminución de los recursos económicos con que se cuentan para abordar estos problemas. A partir de aquí, los investigadores se han visto obligados a ofrecer garantías cuantitativas que sirvan para evaluar el riesgo de la estructura a través de un índice de fiabilidad, tanto para los componentes de la obra así como para el modelo empleado.

La solución a este problema se basa en el uso de métodos de simulación. Los citados métodos se fundamentan en la hipótesis de que las variables empleadas por los modelos son independientes y consideradas como aleatorias. El método de simulación más usado es el denominado método de Monte Carlo, terminología empleada a cualquier técnica que use números aleatorios. Este método tiene gran aplicación, sobre todo en la simulación de muchos fenómenos a través de la generación aleatoria de las variables que inciden el mismo.

En el presente trabajo se implementa, a través de un ejemplo, un procedimiento eficiente que permite realizar la modelación estocástica ó aleatoria de cualquier problema de ingeniería geotécnica. Se parte de la caracterización estadística de las variables que inciden en el estudio y se obtiene, mediante la simulación, la respuesta de las mismas. Esta respuesta (valor medio, desviación estándar y coeficiente de variación) será utilizada para efectuar un posterior diseño analítico de la estructura.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

PRINCIPIOS DE LA MODELACIÓN ESTOCÁSTICA

La modelación estocástica de cualquier problema ingenieril depende de dos factores: el riesgo y la incertidumbre, ambos se describen mediante distribuciones de probabilidad. Para desarrollar la citada modelación es imprescindible la elección al azar de las variables que inciden en el problema. A partir de esta elección se puede reflejar, mediante estos parámetros (el riesgo y la incertidumbre), el carácter estocástico de cualquier sistema analizado (Phoon, 2006).

El riesgo es un efecto aleatorio propio del sistema bajo análisis y se puede reducir alterando el sistema. La incertidumbre es el nivel de ignorancia acerca de los parámetros que caracterizan el sistema a modelar. Esta se puede reducir con mediciones adicionales, mayor estudio o consulta a expertos. A los resultados obtenidos de la combinación de ambos se le denomina *Variabilidad total del sistema*, o sea, el efecto conjunto de ambos parámetros (Phoon, 2006).

De manera general, y considerando la opinión de algunos autores que han abordado este tema, como Ripley (1987) y Centeno (2002), se ha definido un procedimiento para llevar a cabo la modelación estocástica convencional.

METODOLOGÍA PARA REALIZAR UNA MODELACIÓN ESTOCÁSTICA CONVENCIONAL EN PROBLEMAS DE INGENIERÍA

Debido a que el futuro de los códigos de diseño estará determinado por una estrategia que requiere la utilización de modelos probabilísticos, se presenta en esta investigación una propuesta de metodología para llevar a cabo la modelación estocástica. La citada metodología constituye el cambio de una mentalidad determinista a una probabilística. Las herramientas de modelación empleadas son muy sencillas y fáciles de implementar en la práctica.

La metodología presentada se basa en los siguientes aspectos:

1. Definición del modelo ingenieril a estudiar. (Planteamiento del problema)
2. Definición de las variables consideradas como deterministas y aleatorias en el proceso de modelación y diseño.
3. Caracterización estocástica de las variables de entrada.
4. Aplicación de un mecanismo de generación de números aleatorios en función del tipo de distribución definida para cada variable estocástica.
5. Determinación de histogramas y estadígrafos fundamentales para la data resultante de la generación.
6. Comprobación de la aleatoriedad de los datos resultantes.
7. Determinación estocástica de la variable resultante y obtención de la probabilidad de falla.

La metodología propuesta se ha evaluado en uno de los modelos estudiados en la ingeniería geotécnica. El propósito de la aplicación de esta metodología es demostrar su factibilidad, por lo que se ha escogido un caso sencillo de cálculo de capacidad de carga en una cimentación corrida, apoyada sobre un suelo puramente friccional.

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA AL DISEÑO DE UNA CIMENTACIÓN CORRIDA APOYADA SOBRE UN SUELO PURAMENTE FRICCIONAL

1. Definición del modelo ingenieril a estudiar (Planteamiento del problema)

El problema de estudio es el cálculo de la capacidad de carga de una cimentación corrida. Esta estructura está sometida a la acción de carga vertical y se encuentra apoyada sobre un suelo friccional. Figura 1.

En esta Figura se plantea que:

- N: Carga vertical resultante a nivel de cimentación.
- d: Profundidad de cimentación, considerada para este caso de estudio igual a cero, ya que el cimiento se encuentra apoyado sobre el terreno.
- B: Lado menor del cimiento.
- L: Lado mayor del cimiento.
- γ_s : Peso específico del suelo por debajo del nivel de cimentación.
- C: Cohesión del suelo.
- ϕ : Ángulo de fricción interna del suelo.
- qbr: Presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de la cimentación.

Por otra parte, el problema de estudio, desde el punto de vista de diseño, se fundamenta en obtener el valor de la capacidad de carga de la citada cimentación. En este trabajo se plantea que para garantizar el cumplimiento del criterio de capacidad de carga de la base de la cimentación se debe cumplir la siguiente condición:

$$N^* \leq Q_{bt}^* \quad (1)$$

Donde:

Q_{bt}^* : Carga bruta de trabajo resistente a la estabilidad de la base de la cimentación, con su valor de cálculo.

N^* : Carga vertical resultante, con su valor de cálculo, a nivel de cimentación.

Por otra parte, el valor de la Q_{bt}^* para cimientos rectangulares se determina a partir de:

$$Q_{bt}^* = B \cdot L \cdot \left(\frac{q_{br}^* - q^*}{\gamma_s} + q^* \right) \quad (2)$$

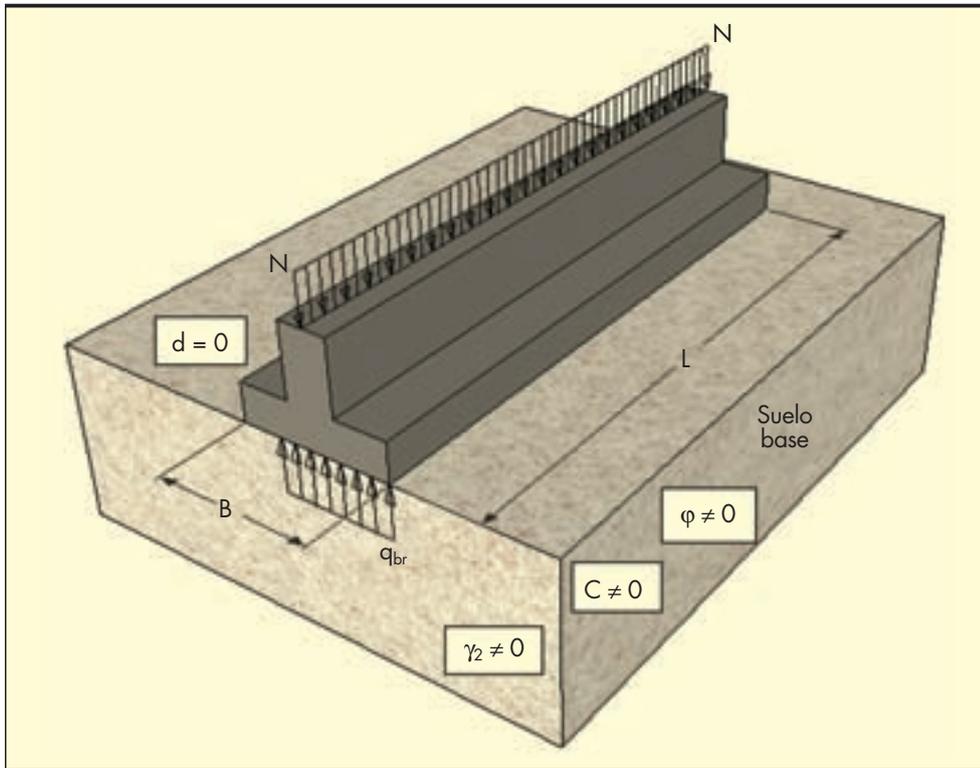


FIGURA 1. Problema de estudio: Cimiento corrido, sometido a carga vertical centrada, apoyado sobre un suelo puramente friccional. Variables que inciden en el diseño.

Donde:

q_{br}^* : Presión bruta de rotura resistente a la estabilidad de la base de la cimentación, con su valor de cálculo. Esta variable se determina a partir de las expresiones definidas por Brinch Hansen (Brinch Hansen, 1961) que plantean:

⇒ Para Suelos ϕ y $C-\phi$:

$$q_{br}^* = 0.5 \gamma_2^* B' N_\gamma s_\gamma i_\gamma d_\gamma g_\gamma + c^* N_c s_c i_c d_c g_c + q^* N_q s_q i_q d_q g_q \quad (3)$$

Donde:

γ_2^* : Peso específico de cálculo por debajo del nivel de cimentación (hasta una profundidad $1.5 B'$).

L' : Lado efectivo en la dirección del lado mayor del cimiento (L).

B' : Lado efectivo en la dirección del lado menor del cimiento (B).

N_γ, N_c, N_q : Factores de la capacidad de carga, que están en función de ϕ^* .

s_γ, s_q, s_c : Factores de corrección debido al efecto de la forma del cimiento (Suelos friccionales).

i_γ, i_c, i_q : Factores de inclinación de la carga actuante (Suelos friccionales).

d_γ, d_c, d_q : Factores que valoran el efecto de la profundidad de la cimentación.

Parámetro	Observaciones
⇒ $\phi = 0$ ⇒ $C = 0$ ⇒ $d = 0$ ⇒ $e = 0; \delta = 0 \Rightarrow B' = B; i_\gamma = i_c = i_q = 1.0$ ⇒ $\phi = 0 \Rightarrow g_\gamma = g_c = g_q = 1.0$ ⇒ $D = 0 \Rightarrow d_\gamma = d_c = d_q = 0$	Suelo Friccional Carga vertical centrada

TABLA 1. Consideraciones para el cálculo de la capacidad de carga para suelos puramente friccionales.

Para el caso analizado se han establecido una serie de consideraciones e hipótesis simplificativas, las cuales se pueden ver en la Tabla 1.

De acuerdo a lo formulado en la tabla 1, la expresión de capacidad de carga se simplifica a:

$$q_{br} = \frac{\gamma_2 B'}{2} \cdot N_\gamma \quad (4)$$

Donde:

$N_\gamma = f(\phi)$ y B' es el lado menor entre L' y B' .

II. Definición las variables consideradas como deterministas y aleatorias en el proceso de modelación y diseño

Un paso imprescindible para desarrollar la modelación estocástica consiste en declarar cuales de las variables que inciden en el diseño se tomarán como deterministas y cuales como aleatorias o estocásticas. En este trabajo se han considerado como estocásticas: el ángulo de fricción interna ϕ , el peso específico del suelo γ , la carga permanente vertical actuante, la carga temporal vertical y la carga vertical de viento.

La variable ancho de la cimentación B , es la única de todas las variables que inciden en el problema que se considera como un parámetro determinista.

III. Caracterización estocástica de las variables de entrada

Teniendo en cuenta nuevamente lo planteado en el paso dos de la metodología propuesta, concerniente a que las variables tratadas como estocásticas serán: el ángulo de fricción interna, el peso específico del suelo, la carga permanente vertical actuante, la carga temporal vertical y la carga vertical de viento, se plantea entonces que los valores medios y los coeficientes de variación analizados, de las citadas variables, fueron tomados de estudios anteriores (Quevedo, 2002).

Variable	Valores medio	Coef. variación
Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ), para $\phi \leq 30^\circ$	25° 27.5° 30°	0.03 0.08 0.10
Ángulo de fricción interna del suelo (ϕ), para $\phi > 30^\circ$	32.5° 35° 37.5°	0.03 0.05 0.08
Peso específico (γ)	18 kN/m ³	0.05
Carga muerta (Ncm)	100 kN/m	0.10
Carga Viva (Ncv)	50 kN/m	0.25
Carga debido a acción del viento (Nw)	20 kN/m	0.31

TABLA 2. Propiedades estocásticas de las variables de entrada.

Estas propiedades estocásticas estudiadas de las variables de entrada se resumen en la Tabla 2.

Conviene aclarar que para todas las variables se ha asumido, partiendo de estudios anteriores resumidos en Quevedo (2002), que el tipo de distribución al que se ajustan las mismas es a una distribución normal. Esta hipótesis se comprueba en el paso VII de esta metodología.

En la metodología propuesta, y de acuerdo con el diseño del experimento ideado para esta investigación, se plantea que con las citadas propiedades estocásticas de las variables de entrada, se procede a desarrollar una búsqueda total. Esto significa que, en un proceso de diseño geotécnico por el primer estado límite, se conformaron todas las posibles combinaciones existentes entre variables y coeficientes de variaciones, siendo todas estas combinaciones evaluadas en la presente investigación.

IV. Aplicación de un mecanismo de generación de números aleatorios en función del tipo de distribución definida para cada variable estocástica

En todo proceso de modelación estocástica se requiere la presencia de un mecanismo generador de números aleatorios, ya precisamente este es el fundamento de tales métodos. En el caso estudiado, fue necesario, para implementar tal mecanismo generador, crear una base computacional que facilitara, no solo la generación de números aleatorios para cada variable, sino también la ejecución del resto del procedimiento de modelación y diseño para todas las combinaciones establecidas entre variables y coeficientes de variación. Para ello, se acude al uso de sistemas de ayuda al ingeniero, específicamente en este trabajo se hace empleo del software Mathcad, versión 14.0.0.163, con el cual se pueden crear programas de trabajo de forma rápida y eficiente. En el citado software se ha implementado un mecanismo de generación de números

aleatorios para variables con distribución normal. En este caso, a través de la función “rnorm”, tal y como se puede ver en la Figura 2, la cual depende del tamaño de la muestra, la media y desviación típica de cada variable analizada.

Con la citada función “rnorm” se le da solución a la generación aleatoria de las variables de entrada que inciden el diseño, pero además se puede continuar desarrollando el diseño, luego de la citada generación, para un tamaño de muestra definido previamente. Este valor del tamaño de muestra ó comúnmente llamado también –tamaño de corrida– será el valor que garantice la convergencia de los parámetros estadísticos estudiados para cada variable, por tanto su obtención depende de un proceso de análisis, el cual se detalla en el siguiente aspecto del trabajo.

DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO MÍNIMO DE CORRIDAS PARA EFECTUAR LA GENERACIÓN ALEATORIA

El tamaño de corrida, denotado como “n”, es el valor que garantiza que a partir de él exista una convergencia en los resultados de los estadígrafos principales de las variables generadas aleatoriamente.

De aquí que, luego de realizar múltiples generaciones para diferentes tamaños de corridas, se obtuvo, para cada valor de ángulo de fricción interna del suelo, el tamaño mínimo de la corrida que garantiza la convergencia de su correspondiente estadígrafo (Valor medio, desviación estándar y coeficiente de variación). Véanse los resultados en la Tabla 3. Adicionalmente, en la Figura 3, se muestra un ejemplo de convergencia del valor medio para el ángulo de fricción interna del suelo. En esta se puede apreciar que el valor mínimo del número de corridas que garantiza que no exista variación numérica en los resultados del valor medio de ϕ es equivalente a 600 corridas, y precisamente esta es la base de la obtención de este parámetro, imprescindible para efectuar una acertada modelación estocástica.

Tipo de suelo	Variable	Estadígrafo	No. de Corridas (n)	Error de convergencia
Suelos friccionales	$\phi = 25^\circ$	Valor Medio	400	0.020
		Desviación Típica	4000	0.010
		Coficiente de Variación	4000	0.001
	$\phi = 30^\circ$	Valor Medio	600	0.020
		Desviación Típica	2000	0.010
		Coficiente de Variación	1000	0.001
	$\phi = 35^\circ$	Valor Medio	1000	0.020
		Desviación Típica	2000	0.010
		Coficiente de Variación	1000	0.001

TABLA 3. Número mínimo de corridas para la generación aleatoria.

CIDEM

Stochastic Modelling of Geotechnical Engineering Problems

1- Entrada de datos Entrar el número de variables $nv := 1..nvar$

Entrar el tamaño de corrida aleatoria $n := 4000$

Valor medio de variables de entrada μ :

$\phi := 30$

tg ϕ	rad.
γ	Kn/m^3
Ncm	Kn
Ncv	Kn
Nw	kn

Coeficientes de variación de variables de entrada

$C_{nv} :=$

0.08
0.05
0.1
0.25
0.31

Desviación estandar de las variables de entradas σ :

$\sigma_{nv} := \mu_{nv} \cdot C_{nv}$

$\sigma_{nv} :=$

0.046
0.9
10
12.5
$3.1 \cdot 10^{-4}$

2- Generación aleatoria por el Método de Monte Carlo (Distribución normal)

Enter the number of bins for histogram: $bin := 30$

Vector of random deviates: $N_{nv} := \text{morm}(n, \mu_{nv}, \sigma_{nv})$

	0
0	0.4709
1	0.6678
2	0.587
3	0.5752
4	0.5576
5	0.575
6	0.6073
7	0.6084
8	0.5525
9	0.6023
10	0.6139
11	0.64
12	0.5282
13	0.6303
14	0.6044
15	...

	0
0	16.404
1	18.56
2	17.757
3	17.07
4	17.569
5	18.629
6	17.235
7	18.546
8	18.215
9	17.677
10	18.666
11	17.598
12	16.313
13	17.334
14	18.384
15	...

	0
0	98.724
1	100.746
2	104.122
3	106.728
4	96.483
5	94.243
6	102.327
7	80.282
8	94.315
9	81.946
10	91.766
11	97.256
12	115.004
13	111.582
14	100.419
15	...

	0
2978	41.09
2979	45.871
2980	44.237
2981	57.124
2982	50.028
2983	77.917
2984	39.964
2985	46.515
2986	50.745
2987	54.063
2988	51.361
2989	64.63
2990	38.536
2991	41.375
2992	54.157
2993	...

	0
3984	$1.021 \cdot 10^{-3}$
3985	$1.298 \cdot 10^{-3}$
3986	$7.35 \cdot 10^{-4}$
3987	$8.157 \cdot 10^{-4}$
3988	$6.181 \cdot 10^{-4}$
3989	$1.12 \cdot 10^{-3}$
3990	$1.531 \cdot 10^{-3}$
3991	$1.185 \cdot 10^{-3}$
3992	$1.157 \cdot 10^{-3}$
3993	$1.815 \cdot 10^{-3}$
3994	$8.988 \cdot 10^{-4}$
3995	$1.021 \cdot 10^{-3}$
3996	$4.183 \cdot 10^{-4}$
3997	$7.772 \cdot 10^{-4}$
3998	$1.224 \cdot 10^{-3}$
3999	...

FIGURA 2. Procedimiento automatizado de generación aleatoria, aplicado a un suelo friccional con ángulo de fricción interna del suelo $\phi = 30^\circ$ y coeficiente de variación $V_{tg\phi}$ igual a 0.08.

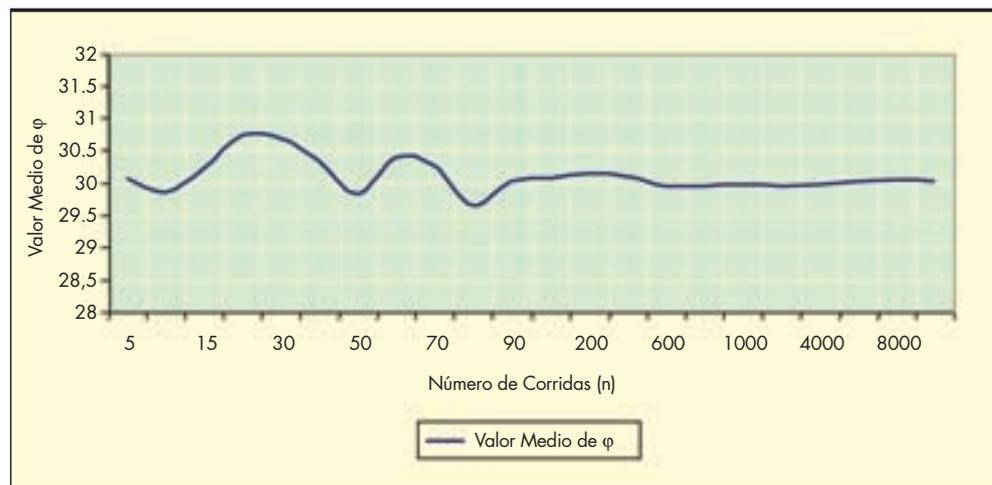


FIGURA 3. Convergencia de la media para suelos friccionales ($\phi=30^\circ$).

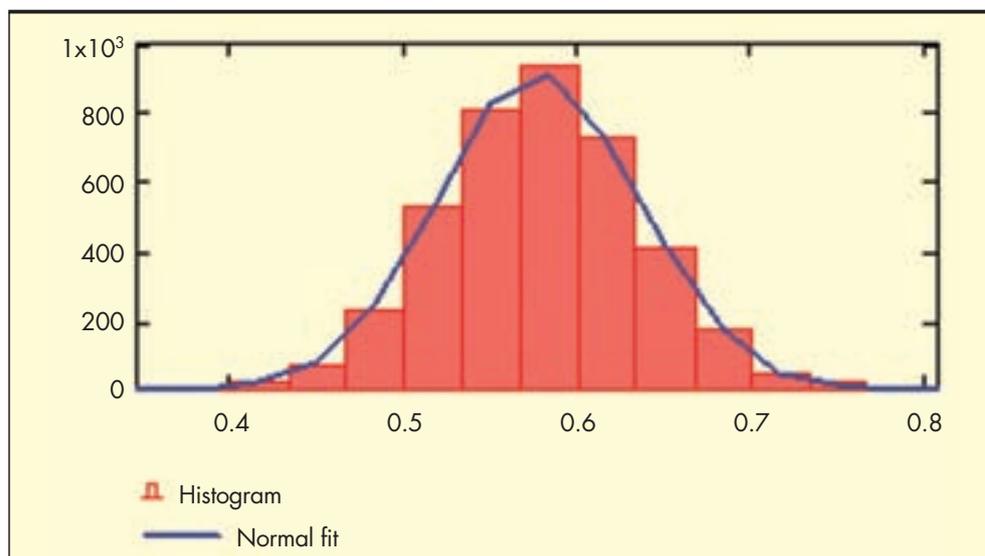


FIGURA 4. Histograma de frecuencias para una de las variables aleatorias consideradas en el cálculo de capacidad de carga: ángulo de fricción interna del suelo ($\varphi = 30^\circ$).

Luego del análisis de estos resultados (los de la Tabla 3 y la Figura 3) se puede concluir que el valor medio de ángulo de fricción interna ($\bar{\varphi}$) no muestra una alta convergencia para series menores de 400 valores. Para garantizar la citada convergencia del valor medio de esta variable (φ), se requiere, como mínimo, de series de 400 o más valores.

Por otra parte, tanto para la desviación estándar así como para el coeficiente de variación de la citada variable φ , la convergencia se alcanza para valores mucho más altos que para el caso del valor medio. De aquí que se pueda plantear que para series de más de 4000 valores existe una convergencia satisfactoria para estos estadígrafos (desviación estándar y coeficiente de variación).

La conclusión más importante de este paso intermedio de la metodología y que aporta a la continuidad de la investigación se basa que, de acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 3, se ha establecido un valor único de tamaño de corrida, para el desarrollo del experimento teórico. Este valor ha resultado ser 4000 (véase nuevamente la Figura 2, en la cual se realiza a generación aleatoria para un tamaño de corrida equivalente a 4000), y se ha escogido este valor por razones lógicas, ya que a partir de este existe una convergencia en los estadígrafos de todas las variables que intervienen en el diseño.

V. Determinación de histogramas y estadígrafos fundamentales para la data resultante de la generación

A partir de los resultados obtenidos en la generación aleatoria (4000 valores de φ , g , N_{cm} , N_{cv} y N_v) se procede a obtener la estadística descriptiva de cada una de las variables. El objetivo de este paso es el de comprobar estos resultados con los empleados antes de efectuar la generación. Posteriormente, se procede a graficar el histograma de frecuencias de cada variable, tal y como puede verse en el ejemplo mostrado en la Figura 4, en este caso para la variable φ .

Luego de efectuado este análisis (el de la Figura 4 y el del resto de los histogramas obtenidos), se concluye que puede lograrse una mejor distribución de frecuencias en la mayoría de las variables excepto en el ángulo de fricción interna. En esta variable la distribución es más discreta, incluso se pudo comprobar que a medida que disminuye el coeficiente de variación de esta variable, la distribución de frecuencias se hace menor. Esta cuestión no afecta en nada la continuidad de la aplicación de la metodología.

VI. Comprobación de la normalidad de los datos resultantes

Existen diversas pruebas para practicar la bondad de ajuste de una data. En el caso específico de esta investigación se ha escogido la prueba de Kolmogorov-Smirnov para comprobar la normalidad de la data resultante. La citada prueba se emplea cuando se puede suponer que la variable bajo consideración tiene una distribución continua, además se considera como una de las más poderosas, por lo que si se cumplen las condiciones para su aplicación, es la prueba que deberá usarse siempre. Los resultados de la aplicación de esta prueba en el ejemplo desarrollado –véase Tabla 4– indican que todas las variables provienen de una distribución normal, tal y como se había supuesto al inicio del procedimiento (Centeno, 2002).

Como se puede apreciar en la última fila de la Tabla 4, todos los resultados del test aportan valores inferiores a los establecidos teóricamente en la citada prueba ($P < 1-\alpha$) para rechazar la hipótesis acerca de que la distribución muestral es del mismo tipo que la hipotética, por lo tanto, se acepta dicha hipótesis

VII. Determinación estocástica de la variable resultante (capacidad de carga q_{br}) y obtención de la probabilidad de falla (PF)

Para alcanzar el objetivo de un diseño geotécnico sobre bases probabilistas, se hace necesario el análisis de las variables que inciden en el mismo. Estas variables han sido definidas en el aspecto II y III de esta metodología; sin embargo, una cuestión de extrema importancia lo constituye la problemática de obtención del ancho (b) de la cimentación.

Para el cálculo de la capacidad de carga se parte, primeramente, de obtener el ancho (b) de la cimentación. Para esto se realiza un diseño geotécnico por el primer estado límite, tomándose para el citado diseño los valores medios de las variables que intervienen en la ecuación de capacidad de carga. (Ecuación 4).

Posteriormente se realiza la generación de valores aleatorios para cada variable. Seguidamente, con todos estos resultados –que son 4000 para cada una de las variables de entrada– se lleva a cabo, nuevamente, el proceso de diseño geotécnico por el primer estado límite. En este diseño se incluye el valor de b , obtenido inicialmente con los valores medios con que se contaba al inicio del problema, o sea, los datos

Parámetros		Ángulo de fricción interna de suelo (ϕ) (en grados)	Capacidad de carga (Qbt) (kN)	Resultante de cargas actuantes (Nm) (kN)
Tamaño de muestra	n	4000	4000	4000
Parámetros normales	Valor medio Desviación Típica	0.578491 0.057577	739.4886 305.8034	113.4134 11.09511
Diferencias extremas	Absoluta Positiva Negativa	0.011 0.011 -0.008	0.080 0.080 -0.056	0.010 0.010 -0.007
Resultado del Test	Kolmogorov - Smirnov Significac. asintótica bi-lateral	0.672 0.758	0.658 0.789	0.639 0.808

TABLA 4. Resultados de la aplicación del Test Kolmogorov Smirnov, para una de las corridas efectuadas, en este caso, un suelo friccional $\phi = 30^\circ$ y Coeficiente de Variación ($V_{ig\phi}$) igual a 0.10.

de valores medios de las variables de entrada, que habían sido tomados de ensayos.

El resultado de todo este proceso son los valores de capacidad de carga –que para esta investigación son 4000–, a los cuales se les determinan los estadígrafos fundamentales y se le comprueba aleatoriedad y normalidad por el test de Kolmogorov Smirnov, de manera similar a lo citado en el paso VI de esta metodología.

OBTENCIÓN DE LA PROBABILIDAD DE FALLA (Pf)

Como paso final de la metodología, se calcula la probabilidad de falla, obteniéndose resultados aproximados al 50% –esto significa una probabilidad de falla igual a 0.5–, en concordancia con lo establecido en las bases teóricas del diseño probabilista. Estos resultados indican que al trabajar con el valor medio de una variable que incide en el proceso de diseño (en este caso: b), definitivamente la probabilidad de falla debe aproximarse a 0.5.

Para calcular esta probabilidad de falla, se ha empleado un método gráfico. Este método consiste en determinar el área bajo la intersección de las curvas de resistencia y cargas (Y_2 y Y_1). Para este se hace uso del concepto de independencia estadística. Este plantea que dos variables aleatorias son estadísti-

camente independientes si la probabilidad de que una variable tome algún valor no afecta en nada la probabilidad de que la otra variable tome cualquier valor. (Rosowsky, 1999).

La consecuencia más importante de este concepto radica en que la probabilidad simultánea de ocurrencia de dos variables aleatorias puede ser calculada como el producto de las probabilidades de cada una de ellas. Ecuación 5.

$$Pf = \int_{-\infty}^{+\infty} F_Q(x) \cdot f_F(x) dx \tag{5}$$

Donde:

$F_Q(x)$: Función de distribución de probabilidades de la resistencia.

$f_F(x)$: Función de densidad de probabilidades de las cargas.

A partir de la Ecuación 5 se calcularon los valores de probabilidad de falla. Estos resultados han sido graficados y pueden verse en el ejemplo de la Figura 5. Donde:

$F_{nqbt}(x)$: Función de distribución de probabilidades de la capacidad de carga (Qbt).

$F_{nNm}(x)$: Función de distribución de probabilidades de las cargas (Nm).

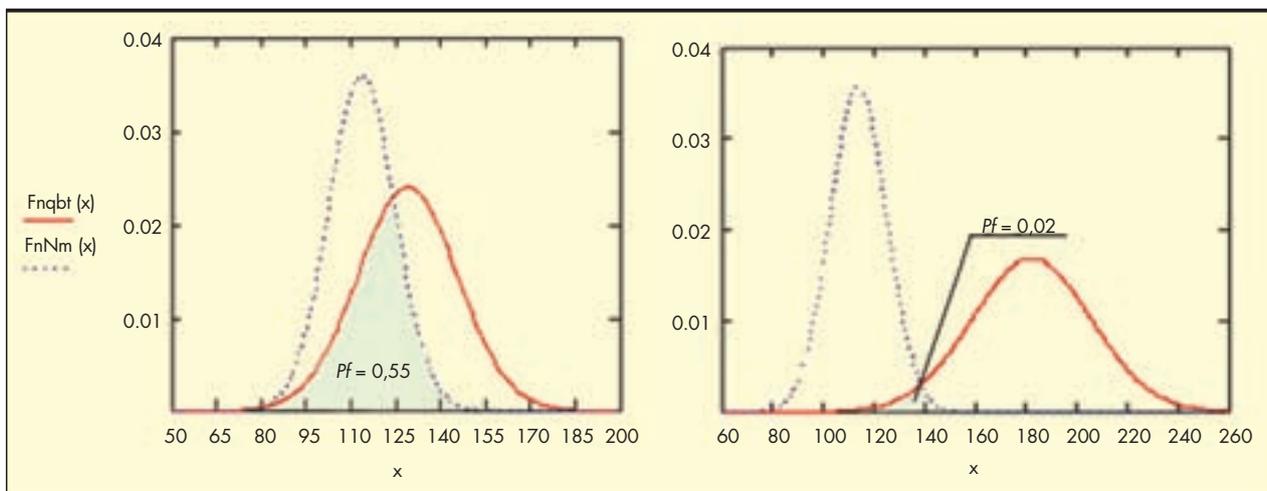


FIGURA 5. Funciones de distribución de probabilidades de las cargas y la resistencia para suelos fricciones: a) $\phi = 30^\circ$, $\nu = 0.03$, $b_{diseño} = 0.84$ m. b) $\phi = 30^\circ$, $\nu = 0.03$, brequerida = 1.04 m.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO SOBRE BASES PROBABILISTAS PARA EL CASO EN ESTUDIO

Tomando como punto de partida, los valores obtenidos de capacidad de carga, se procede a determinar el valor medio de la citada variable. De igual modo se aplican las ecuaciones establecidas para la obtención del valor medio de las cargas actuantes. Finalmente se calcula la desviación estándar y el correspondiente coeficiente de variación, tanto para las cargas así como para la capacidad de carga, de acuerdo a las expresiones:

$$u_{Y_1} = \frac{\sigma_{Y_1}}{Y_1} \tag{7}$$

$$u_{Y_2} = \frac{\sigma_{Y_2}}{Y_2} \tag{8}$$

Siendo:

σ_{Y_1} y Y_1 : Resultados de la desviación estándar y valor medio de las cargas actuantes.

σ_{Y_2} y Y_2 : Resultados de la desviación estándar y valor medio de la capacidad de carga. (Estos valores son obtenidos a partir de un análisis estadístico descriptivo, para cada variable).

Como segundo paso, teniendo en cuenta que los valores de b obtenidos (bdis), no satisfacen la condición de probabilidad de falla ($Pf \leq 0.02$) en cimentaciones, es necesario encontrar los valores de b que garanticen tal condición (breq). Para esto se lleva a cabo nuevamente el proceso de diseño; se parte de un valor de b que se irá variando hasta satisfacer la citada condición ($Pf \leq 0.02$), o sea $H=0.98$ (Nivel de seguridad). Tablas 5 y 6.

Luego del análisis de los resultados de las Tablas 5 y 6 devienen conclusiones muy importantes. Tales conclusiones ratifican las bases y las hipótesis consideradas para el desarrollo de la metodología propuesta. En primer lugar y como conclusión más importante, se puede ver que los resultados de probabilidad de falla obtenidos con el ancho b, resultante

Resultados del diseño con variables aleatorias (Suelos $\varphi \leq 30^\circ$)													
σ (°)	$V_{tg\varphi}$	bdis (m)	Y_1 (kN)	u_{Y_1}	Y_2 (kN)	u_{Y_2}	Pf	breq (m)	Y_1 (kN)	u_{Y_1}	Y_2 (kN)	u_{Y_2}	Pf
25	0,03	1,26	113,413	0,098	129,697	0,118	0.525	1,53	113,413	0,098	190,28	0,118	0,019
25	0,08	1,26	113,413	0,098	134,05	0,292	0.525	2,10	113,413	0,098	359,40	0,288	0,020
25	0,10	1,26	113,413	0,098	136,84	0,366	0.508	2,61	113,413	0,098	555,61	0,357	0,021
27,5	0,03	1,03	113,413	0,098	129,64	0,124	0.533	1,26	113,413	0,098	192,89	0,123	0,020
27,5	0,08	1,03	113,413	0,098	134,584	0,310	0.522	1,80	113,413	0,098	394,67	0,304	0,02
27,5	0,10	1,03	113,413	0,098	137,772	0,389	0.504	2,32	113,413	0,098	673,19	0,378	0,021
30	0,03	0,84	113,413	0,098	128,754	0,130	0.558	1,04	113,413	0,098	196,07	0,129	0,020
30	0,08	0,84	113,413	0,098	134,315	0,329	0.529	1,55	113,413	0,098	436,61	0,321	0,021
30	0,10	0,84	113,413	0,098	137,928	0,414	0.523	2,25	113,413	0,098	920,61	0,399	0,021

TABLA 5. Resultados del diseño con entrada de variables estocásticas o aleatorias, para suelos puramente friccionales ($\varphi \leq 30^\circ$).

Resultados del diseño con variables aleatorias (Suelos $\varphi > 30^\circ$)													
σ (°)	$V_{tg\varphi}$	bdis (m)	Y_1 (kN)	u_{Y_1}	Y_2 (kN)	u_{Y_2}	Pf	breq (m)	Y_1 (kN)	u_{Y_1}	Y_2 (kN)	u_{Y_2}	Pf
32,5	0,03	0,69	113,413	0,098	130,055	0,136	0.536	0,86	113,413	0,098	200,53	0,136	0,020
32,5	0,08	0,69	113,413	0,098	131,935	0,218	0.539	0,98	113,413	0,098	260,70	0,216	0,021
33,5	0,10	0,69	113,413	0,098	136,408	0,349	0.51	1,37	113,413	0,098	510,12	0,339	0,020
35	0,03	0,56	113,413	0,098	129,074	0,143	0.561	0,71	113,413	0,098	205,73	0,143	0,019
35	0,08	0,56	113,413	0,098	131,173	0,231	0.551	0,82	113,413	0,098	274,73	0,228	0,020
35	0,10	0,56	113,413	0,098	136,196	0,37	0.513	1,20	113,413	0,098	589,03	0,358	0,021
37,5	0,03	0,46	113,413	0,098	192,308	0,151	0.499	0,58	113,413	0,098	208,77	0,150	0,020
37,5	0,08	0,46	113,413	0,098	261,34	0,244	0.507	0,68	113,413	0,098	287,29	0,240	0,021
37,5	0,10	0,46	113,413	0,098	599,444	0,393	0.482	1,08	113,413	0,098	725,43	0,378	0,021

TABLA 6. Resultados del diseño con entrada de variables estocásticas o aleatorias, para suelos puramente friccionales ($\varphi > 30^\circ$).

de un diseño con valores medios (bdis), aportan resultados aproximados al 50%. Sin embargo, para lograr que la probabilidad de falla de la estructura cumpla con la condición de diseño, de acuerdo a criterios de seguridad ($P_f=0,02$, para estructuras geotécnicas) se hizo necesario incrementar el valor de b (breq).

Con este incremento de b , se obtuvo que para garantizar tal condición, es preciso crecer estos valores (los de bdis), en ocasiones hasta más del doble de su valor inicial. Aunque, en la medida en que aumenta el valor de la variable ϕ , el ancho del cimiento es menor y por lo tanto es menor el ancho requerido para hacer cumplir la condición de seguridad.

Por otro lado, puede verse que el coeficiente de variación de la variable respuesta Y_2 , se incrementa en la medida en que aumenta el coeficiente de variación ϕ . Este incremento ocurre, incluso para un mismo valor de ángulo de fricción interna del suelo.

Al analizar los resultados de probabilidad de falla, se aprecia una disminución de esta variable, cuando para un mismo ángulo de fricción interna del suelo se varía su coeficiente de variación. Sin embargo, si se analiza este fenómeno, variando el ángulo de fricción interna del suelo, para un mismo coeficiente de variación de esta variable, se puede apreciar, una disminución en la cuantía de Y_2 , y una disminución de la probabilidad de falla correspondiente.

Es importante aclarar que en este ejemplo, el valor medio de las cargas actuantes así como sus coeficientes de variación permanecen constantes. Esto es propiamente parte del proceso de diseño, o sea, aquí se trabaja para obtener un valor de capacidad de carga y para esto las cargas son parte de los datos del problema, por lo que no varían. Sin embargo sí se analizan estadísticamente ya que inciden directamente en la determinación de la probabilidad de falla.

Como conclusión final, se plantea que los valores de probabilidad de falla obtenidos mediante vías analíticas, como la implementada en esta investigación generan un margen más grande de errores en los resultados. A partir de aquí, puede deducirse que los valores de b_{req} se pueden disminuir si se implementa una vía de obtención de probabilidad de falla que garantice una eficiencia superior. Esto bien pudiera ser mediante el empleo de métodos probabilistas de diseño, específicamente empleando la *Teoría de la seguridad*, la cual se basa absolutamente en conceptos probabilistas, pero el desarrollo de estas teorías constituye el tema de otras investigaciones.

COMPARACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA CON LOS MÉTODOS TRADICIONALES EXISTENTES DE DISEÑO

A modo de conclusión se lleva a cabo una comparación desarrollando tres diseños con idénticas condiciones. Específicamente este caso, se presenta una cimentación superficial apoyada sobre un suelo puramente friccional, con un valor de ángulo de fricción $\phi=30^\circ$. A partir de este proceso se han obtenido los resultados de la Tabla 7.

Se puede apreciar en la Tabla 7 que haciendo uso del método de estados límites se obtiene un valor resultante de diseño muy inferior al obtenido a través de la aplicación del método del factor de seguridad global, lo cual tiene sentido a partir de las bases que se establecen para el citado método, en el cual cada variable del diseño es conducida a un valor de cálculo que permita comprobar el estado límite analizado. Asimismo se nota que el valor del coeficiente de seguridad general K disminuye considerablemente pues este ahora es el resultado de la multiplicación de los coeficientes de seguridad de las cargas, los materiales y un coeficiente de seguridad general, los cuales son definidos de modo estadístico, a partir de resultados de ensayos realizados para cada una de estas variables –las actuantes y las resistentes–.

Por otro lado, ya cuando se introduce el tema de la simulación estocástica, se está haciendo un aproximación y un análisis estadístico mucho más severo, en este caso se analizan todas las variables en conjunto, y a posteriori, al introducir el tema de la seguridad que también tiene un fundamento estadístico complejo, se logra la combinación perfecta para lograr un resultado mucho más eficiente y así lo demuestra el valor de ancho de cimentación obtenido y el cual puede verse en la tercera fila, segunda columna de la Tabla 7. Con este valor se ha alcanzado una economía en el diseño equivalente a un 65% comparado con el método del factor de seguridad global, incluso considerable esta reducción en relación al método de la Teoría de la seguridad que hasta el momento era el método más racional de diseño geotécnico.

De igual manera se ha alcanzado una reducción considerable en el factor de seguridad global K , y esto se debe a la inserción de un análisis estadístico más notable y en conjunto, amparado por la aplicación de técnicas sofisticadas de simulación.

Por tales motivos, se plantea que el diseño por métodos estocásticos, además de modelar de manera más realista las condiciones de un diseño geotécnico, se considera un método mucho más racional en el diseño de cimentaciones superficiales, tal y como puede verse en los resultado de la citada Tabla 7.

4. CONCLUSIONES

1. Las herramientas fundamentales para desarrollar una buena modelación estocástica lo constituyen la construcción del modelo, el análisis estadístico de las variables que inciden, y la presencia de un mecanismo de generación de números aleatorios.
2. La caracterización estadística de las variables aleatorias que intervienen en los diseños geotécnicos: cargas actuantes y propiedades físico-mecánicas de los suelos, tomada del estudio y valoración de la experiencia nacional e internacional, es factible de aplicar en la modelación estocástica convencional.
3. El valor mínimo de la serie con la que se debe trabajar, para obtener resultados confiables en la variable de res-

Método de diseño empleado	Ángulo de fricción ϕ ($^\circ$)	Brequerida (m)	Coficiente de seguridad general K
Factor de Seguridad Global	30	1,75	3.00
Estados Límites.	30	1.55	2.34
Diseño en seguridad	30	1.14	1.45

TABLA 7. Resultados del diseño comparativo de la metodología propuesta con métodos existentes.

puesta, luego de todo el proceso de simulación, es de 4000 juegos de datos.

4. Los resultados de la simulación estocástica con solución analítica han definido la magnitud de los coeficientes de variación de las cargas y la resistencia de los materiales, sin embargo la probabilidad de falla obtenida se dispersa de la condición de diseño por seguridad; por lo que se hizo necesario una solución probabilista del problema para garantizar la citada condición.
5. Se ha demostrado la efectividad de la metodología propuesta, cuando esta es aplicada con solución analítica, con respecto a métodos anteriores de diseño, de aquí que esta es factible de aplicar para cualquier caso práctico de diseño geotécnico, debido a su exactitud y su bajo consumo computacional.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ripley, B. D. 1987. Stochastic Simulation. Wiley and Sons, N.Y.
2. Leuangthon, O. 2006. The principles of Monte Carlo Simulation, University of Alberta, Canada.
3. Quevedo, G. 2002. Aplicación de los Estados Límites y la Teoría de Seguridad en el Diseño Geotécnico en Cuba. Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias. Comisión de Grado Científico de la República de Cuba, La Habana, Cuba.
4. Brinch Hansen, J. 1961. A general formula for bearing capacity. The Danish Geotechnical Institute, Bulletin No 11, Copenhagen.
5. Centeno, R. 2002. Simulación de Monte Carlo y su aplicación a la Ingeniería Geotécnica. VIII Conferencia Gustavo Pérez Guerra. Universidad Central de Venezuela. Escuela Ingeniería Civil. Caracas, Venezuela.
6. Phoon, K. 2006. Modeling and simulation of stochastic data. Singapore. Department of civil engineering, University of Singapore.
7. Quevedo, G., Recarey, C. 2005. Modelación Estocástica y Teoría de Seguridad en el estudio de conexiones de estructuras mixtas. Universidad Politécnica de Cataluña. España.
8. Rosowsky, D. V. 1999. Structural Reliability, Structural Engineering Handbook. Clemson University, Clemson, SC, Ed. Chen Wai-Fah Boca Raton: CRC Press LLC.
9. Koris, K., Szalai, K. 1998. Stochastic distribution of structural resistance in reinforced concrete beams. 2do Simposio de Phds. en Ingeniería Civil. Universidad de Budapest, 1998.

Aplicación de una ecuación de velocidad media en régimen no uniforme: Análisis detallado del transporte en el canal Caltech usando Excel

ALFREDO JOSÉ CONSTAIN ARAGÓN (*)

RESUMEN Se presenta aquí una revisión provisional del artículo de J.W. Elder relativa al Coeficiente Longitudinal de dispersión para cauces naturales. Esta ecuación práctica basada a su vez en el trabajo pionero de G.I. Taylor fue muy importante para guiar los primeros experimentos en dispersión y en la evaluación de las predicciones y control de la contaminación en los cauces. Sin embargo debido a que su aplicación no coincidía suficientemente bien con los resultados de las fórmulas más complejas usadas para “calibrarla”, las investigaciones se dirigieron en adelante más bien al ajuste estadístico de los modelos con paquetes complejos de software.

Una serie de razones indicaría que hay problemas de fondo más bien en la construcción de los modelos de “calibración”, especialmente en la parte dimensional. Esto puede solucionarse si se abandona la constancia del Coeficiente Longitudinal de dispersión, el cual realmente debe ser una función del tiempo. Esta dependencia se deriva de la formulación de una nueva ecuación para la velocidad media del flujo como se presentara aquí. Corrigiendo así esta interpretación errónea se puede restituir la “exactitud perdida” de la fórmula de Elder. Para este objeto se analiza el reporte KH-R-12-1966 de tesis doctoral de H.B. Fischer, en especial un experimento muy bien documentado en el canal de 40 metros del Mc Keck Laboratory del Caltech en Pasadena, Estados Unidos.

Dentro de la metodología presentada, el autor propone la resolución de los problemas de modelamiento mediante un simple esquema de aplicación de Excel, permitiendo también realizar análisis de sensibilidad muy útiles. Así mismo es posible calcular aproximadamente el tiempo de arribo de las primeras partículas de soluto en un proceso de vertimiento y el tiempo de permanencia final de dichas partículas, parámetros estos de gran importancia en los actuales estudios de calidad de aguas. Finalmente se hacen unas conclusiones.

APPLICATIONS OF MEAN VELOCITY EQUATION IN NON UNIFORM FLOW: DETAILED ANALYSIS OF TRANSPORT IN A CALTECH CHANNEL USING EXCEL

ABSTRACT *It is presented a provisional review of the J.W. Elder's formula about longitudinal dispersion coefficient for natural streams. This practical equation based on previous pioneering work of G.I. Taylor was very important to guide first experiments in dispersion and in evaluation of prediction and control of contaminations in streams. However, because of its application did not coincide sufficiently well with results of more complex models used to “calibrate it”, the later researches was oriented in ahead rather to statistical adjustment by means of complex software packages.*

A number of reasons would indicate that there are background problems rather with construction of these “calibration” models, because of dimensions. This may be solved if it is abandoned the constancy of longitudinal dispersion coefficient, which indeed should be a time function. This dependence is derived from a new mean velocity equation as will be explained herein. Correcting in this way this wrong interpretation it is possible to restore the “lost accuracy” of Elder's formula. To do that it is analyzed the report KH-R-12-1966 of PhD thesis of H.B. Fischer specially a very well documented experiment in 40 m flume of Mc Keck Laboratory of Caltech in Pasadena, USA. Within the presented methodology, the author proposes the solution of modelation problems using only an elementary Excel application, allowing a useful sensitivity analysis also. In the same way it is possible to calculate approximately the arrival time of solute particles in a pouring process and permanency time of those particles, very important parameters for nowadays studies of quality of water. Finally it is sated a set of conclusions.

Palabras clave: Hidráulica fluvial, Transporte de masa, Dispersión, Modelación y Técnicas de trazador.

Keywords: Fluvial Hydraulics, Mass transport, Dispersion, Modelation and tracer techniques.

(*) Ingeniero, Gerente y Director I+D Hydrocloro Ltda, Bogotá DC, Colombia. E-mail: alfredo.constain@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Hoy en día es muy importante el conocimiento preciso del Coeficiente Longitudinal de dispersión para modelar y predecir las concentraciones y extensión de sustancias contaminantes en flujos naturales. En efecto, el patrón con el cual se extienden estas en el flujo y la tasa a la cual disminuye su concentración pico son conocimientos críticos para el control de poluciones. Los grandes presupuestos de los programas de disminución de las contaminaciones hídricas en todo el mundo, provenientes principalmente de los impuestos por impacto ambiental (eco-tasas) no tendrían un destino claro sin disponer de la información científica oportuna, completa y precisa sobre esta dinámica del transporte en los flujos. Sin embargo, el desarrollo de las formulas para el cálculo de los coeficientes de las ecuaciones que describen estos fenómenos ha sido difícil y aun hoy en día no está libre de controversias dadas las discrepancias entre la teoría y los resultados experimentales.

La teoría básica de la dispersión de solutos en los flujos naturales es de aparición más bien reciente pues son desarrollos teóricos que van de 1953 en adelante. Una primera descripción de la dispersión se basa en las propiedades del fluido, de su geometría y del estado de turbulencia, ya que el patrón con el cual se extienden las sustancias en el flujo y la tasa de disminución de su concentración pico son dependientes en esencia de la distribución de velocidades del fluido. G.I. Taylor (Taylor, 1954) inicialmente afirmó que aunque el principal mecanismo para la dispersión de las partículas de solutos en flujos cortantes fuese la presencia de un campo variable de velocidades en la sección transversal, el proceso entero podía ser descrito por una expresión de difusión Fickiana en una dimensión (la dirección del flujo).

$$j_m = -\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \tag{1}$$

Aquí j_m es el flujo de sustancia (masa por unidad de área y por unidad de tiempo), c la concentración de soluto (masa por unidad de volumen) y ϵ_x el coeficiente de transporte en el eje longitudinal (distancia al cuadrado por unidad de tiempo). El uso de los coeficientes para describir la dispersión en tubos rectos muy largos mediante la ecuación (1) fue una innovación conceptual que abrió ventanas importantes a la descripción compacta del transporte de masa, según las dos principales leyes para los cauces naturales en este aspecto: La ecuación diferencial de Adveccion-Difusión (ADE) y su solución la función acampanada de Fick, definidas para condiciones conservativas (sin pérdida o ganancia de masa), en flujo uniforme longitudinal.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U_x \frac{\partial C}{\partial x} = E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{2}$$

y

$$C(x, t) = \frac{M}{A\sqrt{4tE}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}} \tag{3}$$

Aquí E es el Coeficiente longitudinal de dispersión que se considera una constante, M es la masa de trazador (solute) y A es el área de la sección transversal del flujo. Estas ecuaciones son validas cuando el trazador ha cubierto uniformemente el área de la sección transversal en la que vale entonces una velocidad media espacial, U . Posteriormente J.W. Elder y H.B.Fischer (Elder, 1959) (Fischer, 1966) (Fischer, 1969) extendieron sus análisis a flujos turbulentos naturales. Sin embargo pronto fueron evidentes las grandes divergencias de estos modelos estacionarios con respecto a los resultados experimentales, especialmente en cuanto a la interpretación y explicación del fenómeno de asimetría de las curvas de trazador. (Day, 1977)(Fischer, 1967)(Fischer, 1968).

2. DESARROLLO ESPECÍFICO DE TAYLOR Y ELDER

Es de importancia revisar los conceptos físico-matemáticos que llevaron a Taylor primero y luego a Elder a proponer las respectivas ecuaciones para el Coeficiente Longitudinal de dispersión. Se parte de la ecuación de balance de masa en la que se describen tanto el movimiento advectivo (ordenado) asociado a una porción continua de fluido caracterizado una sola velocidad y dirección promedios, como el movimiento difusivo (desordenado) que no puede ser descrito por una sola velocidad ni dirección. (Holley, 1969), Figura 1.

Tiene sentido formular la ecuación de conservación de la masa en un volumen pequeño con un promedio temporal para la concentración c (barrada) y las velocidades longitudinal, transversal y vertical respectivamente, u , v y w . Están también los coeficientes de difusión.

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} \right) \tag{4}$$

El miembro izquierdo da cuenta del movimiento advectivo mientras que el miembro derecho corresponde al movimiento difusivo. Partiendo del supuesto de flujo uniforme y para un tubo recto indefinidamente largo, Taylor, considerando que aunque la principal causa del rompimiento aleatorio de las plumas de solutos en los flujos turbulentos fueran las variaciones de la velocidad convectiva dentro de la sección transversal del flujo, bajo ciertas circunstancias ese transporte podía ser representado como proporcional simple al gradiente de concentración, acorde con la ecuación (1): propuso entonces una solución aproximada para la ecuación (4) de la forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} \approx E \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \tag{5}$$

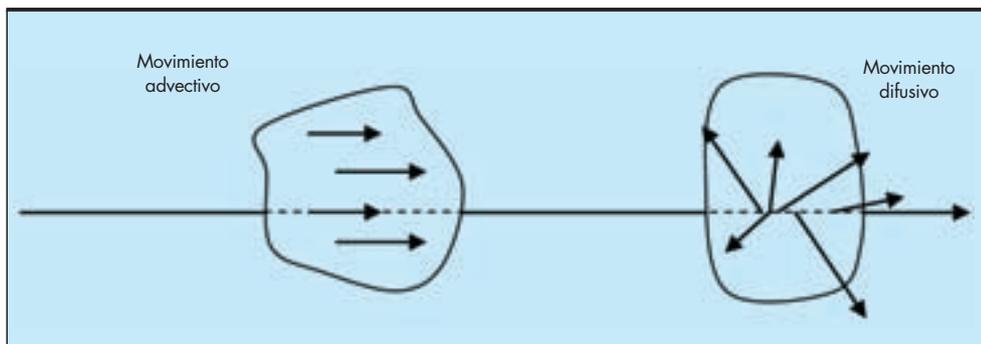


FIGURA 1. Movimiento advectivo y movimiento difusivo.

Nótese que Taylor pasa del promedio temporal al promedio espacial, en concreto referido al desperdigamiento de la concentración de soluto en la sección transversal, ya que su ámbito básico de descripción es esta área.

$$C = \frac{1}{A} \iint_A c \, dA \quad (6)$$

Por consiguiente la ecuación aproximada de Taylor (5) se aplica a un plano moviéndose con el centro de masa de soluto a una velocidad media U . Para tener esto en cuenta Taylor define una ecuación simple de transformada de Galileo utilizando una falsa variable de distancia, ξ , propia para un observador situado fijo en un punto del tubo.

$$\xi = X - U t \quad (7)$$

La idea básica de Taylor (según Holley) es discriminar lo más claro posible las condiciones bajo las cuales la ecuación (5) es válida. Realiza entonces las siguientes simplificaciones en la ecuación diferencial (4) para tratar de obtener una solución referida a la dispersión: Lo primero que establece son los valores actuales de las magnitudes de interés a partir de las fluctuaciones de concentración y velocidad, c' y u' , y de los valores promedio espaciales, C y U en la sección transversal.

$$c = C + c' \quad (8)$$

$$u = U + u' \quad (9)$$

Taylor asume que las fluctuaciones de concentración son medidas únicamente en el plano (ZY) que define la sección transversal:

$$c' = c'(z, y) \quad (10)$$

Además hace muy pequeños los términos diferenciales para la turbulencia y la advección longitudinales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) \approx 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} \approx 0 \quad (12)$$

Por último hace despreciables las velocidades transversal y vertical para el fluido, puesto que sus valores medios son nulos y su distribución estadística es similar:

$$v = w = 0 \quad (13)$$

En estas condiciones la ecuación básica de balance de masa queda:

$$u' \frac{\partial c'}{\partial \xi} \approx \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial c'}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial c'}{\partial z} \right) \quad (14)$$

Esta ecuación diferencial tiene una solución de la forma:

$$c' = f \frac{\partial c}{\partial \xi} \quad (15)$$

Donde f es función solo de los parámetros del flujo y de la forma de la sección transversal del mismo. Teniendo en cuenta la definición de transporte de masa por fluctuaciones y utilizando el concepto Fickiano inicial de Taylor sobre la dispersión se tiene:

$$\int_A u' c' \, dA \approx -AE \frac{\partial c'}{\partial \xi} \quad (16)$$

Ahora, en función del transporte turbulento asociado al valor medio espacial las variaciones de velocidad y concentración la ecuación (5) se puede escribir:

$$j_i = \overline{u' c'} \approx -E \frac{\partial C}{\partial x} \quad (17)$$

Lo que ocurra con las fluctuaciones de velocidad u' y de concentración c' en la sección transversal móvil es el factor más importante de la dispersión, por lo tanto en este punto es necesario ver como se relacionan estas variables entre sí y con otros aspectos del fenómeno. (Holley, 1969) En primer lugar la variación de velocidad u' dependerá fuertemente de la propia distribución de velocidades advectivas, esta condición es básica y se mantiene como una característica a tener en cuenta en todo el desarrollo posterior. En segundo lugar –pero no menos importante– si bien la fluctuación de concentración c' se mantiene descrita *solamente* sobre el plano móvil asociado a la sección transversal sobre el centro de masa, ecuación (10), tiene un efecto grande sobre la fluctuación de velocidad u' bien sea *adelante* o *detrás* de dicho plano (pues u' no se circunscribe solo al plano). En efecto, se analiza que entre más pequeña sea esta fluctuación en el plano con relación al valor espacial promedio, $c' \ll C$, mas *simétricos* serán los valores de u' *adelante* y *detrás* de dicho plano. Como quiera que se deba asegurar de entrada esta simetría para que las ecuaciones (1), (5) y (16) se cumplan en el sentido de que el transporte dispersivo *únicamente* dependa del gradiente de concentración longitudinal, se postula que la ecuación básica de Taylor (5) se aplique solo en condición de *flujo uniforme* que asegure velocidades iguales (y constancia del coeficiente E). Esta condición se aplicara invariablemente en desarrollos posteriores. A partir de este análisis Saffman postula que la ecuación de Taylor puede aplicarse *únicamente después* de un periodo inicial (convectivo) cuando la difusión transversal se haya extinguido, es decir cuando el soluto se haya distribuido homogéneamente en la sección transversal, lo que se conoce como condición de “Mezcla completa” (Fischer, 1968).

Las ecuaciones (16) y (17) son importantes porque definen el Coeficiente Longitudinal de dispersión en función de las fluctuaciones de velocidad y concentración. Combinando la ecuación (16) con la (15) se puede eliminar el término de fluctuación c' manteniendo el término de fluctuación u' y quedando la definición práctica final. Aquí h es un valor específico de z Aquí h es la coordenada significativa:

$$E = -h^2 \int_0^1 u' d\left(\frac{z}{h}\right) \int_0^{z/h} \left(\frac{1}{\epsilon_y}\right) d\left(\frac{z}{h}\right) \int_0^{z/h} u' du' \quad (18)$$

Aplicando la distribución universal de velocidades establecida por Nikuradse (French, 1987) y considerando una variación radial a , integrando las expresiones correspondientes Taylor llega a su definición para el Coeficiente longitudinal de dispersión en el tubo recto largo.

$$E = 10.1 a U^* \quad (19)$$

Donde U^* es la llamada “velocidad cortante” y en la que g es la aceleración de la gravedad y S es la pendiente a través de la cual se desarrolla el flujo gracias al efecto gravitacional de la componente del peso

$$U^* = \sqrt{g a S} \quad (20)$$

Asumiendo una distribución vertical de velocidades la siguiente forma, con κ como la Constante de von Kármán, (Elder, 1959):

$$u = \frac{U^*}{\kappa} \left(1 + Ln\left(\frac{z}{h}\right)\right) \quad (21)$$

Elder llega finalmente a la siguiente definición clásica para el Coeficiente Longitudinal de dispersión en cauces naturales:

$$E = 5.93 h U^* \quad (22)$$

3. ANÁLISIS DEL ENFOQUE DE TAYLOR Y ELDER

Aunque la formula de Elder tiene su anclaje en la suposición de una naturaleza Fickiana para la dispersión, los resultados experimentales realizados con posterioridad al establecimiento de la ecuación, insertando los valores de E obtenidos con (22) en las ecuaciones de transporte (1) y (2) dan un amplio rango de respuestas, y lo peor, que la forma misma de las curvas experimentales no concuerda con la del modelo. H.B. Fischer por lo tanto conjetura que el propio concepto de difusión Fickiana aplicado por Taylor a la dispersión en cauces naturales *puede estar en un error* (Fischer, 1966).

Un primer punto a profundizar en esta situación contradictoria es la aplicación sobre valorada que se hace de la restricción misma de flujo uniforme para la ecuación. De acuerdo con el análisis detallado que de la hipótesis de Taylor hace E. R. Holley referida en el apartado anterior de este artículo, la condición de flujo uniforme se introduce fundamentalmente para que la hipótesis Fickiana se cumpla cabalmente, esto es que el transporte *solo* dependa del gradiente de concentración. Si no hubiese este tipo de flujo entonces las velocidades del trazador (incluidas las fluctuaciones u') *adelante y atrás* no serían simétricas y el coeficiente E sería *variable* Figura 2. Esta condición aparentemente coherente con el hecho físico, en realidad introduce un elemento extraño, contradictorio en la descripción física de la dispersión puesto que en multitud de verificaciones experimentales, *aunque haya flujo uniforme* la diferencia aparente de velocidades *adelante-atrás* se mantiene generando una "asimetría" de la curva de concentración de soluto.

Para dilucidar esta aparente paradoja, un punto importante a analizar es que la ecuación (7) utiliza en realidad una transformación de Galileo y ella debe tomarse con todas sus consecuencias. Una de ellas es que permite la descripción del evento por diferentes observadores del sistema, teniendo en cuenta las diferentes velocidades a componer. Esas velocidades se muestran en la Figura 3 que describe una curva real de trazador y corresponden al movimiento advectivo asociado a la velocidad U , y al movimiento dispersivo asociado a las velocidades dispersivas a lado y lado del centro de masa $\pm V_{disp}$. Con la composición Galileana operando se ve entonces un filo frontal de la distribución más pendiente debido a la suma de $U+V_{disp}$ y luego un flanco descendiendo más lento debido a

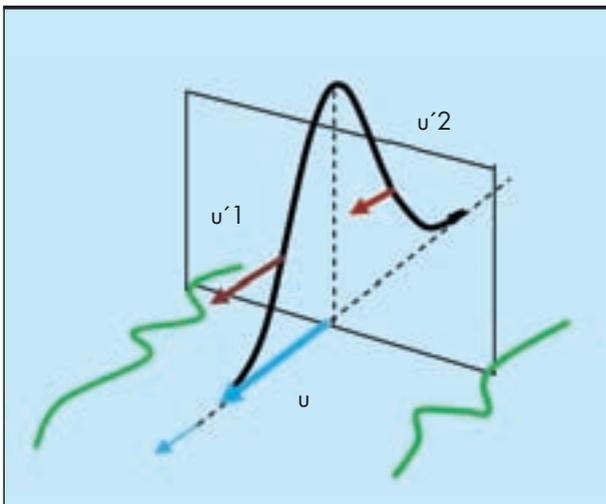


FIGURA 2. Asimetría de las velocidades de transporte adelante y atrás del plano móvil.

la composición $U-V_{disp}$. Por lo tanto la descripción del fenómeno desde el punto de vista de la cinemática relativista clásica lleva de forma natural a la presencia de una asimetría de la curva de concentración del soluto mirada por un observador fijo en el límite del flujo.

Por el contrario, si el observador viaja con la velocidad U sobre el centro de masa de soluto, en tal sistema desaparece la velocidad media U (pues el observador se mueve con ella) y la curva que describe la ecuación es perfectamente Gaussiana. Esta última circunstancia es muy importante pues se puede afirmar que la naturaleza Fickiana de la distribución nunca se pierde, ni aun en momentos muy cercanos al vertimiento en el flujo (como lo suponía equivocadamente Saffman).

Pese a que han pasado más de 40 años desde que H.B. Fischer publicó el informe KH-R-12, los problemas fundamentales que aborda el estudio se mantienen sin una solución integral y completa, habiéndose más bien derivado a soluciones de software mediante la aplicación de complejos algoritmos de ajuste de las curvas teóricas para que converjan con las experimentales, lo cual se logra pero en detrimento de la capacidad explicativa y predictiva de las teorías utilizadas. De hecho, al no tenerse una explicación razonable para la asimetría de las curvas de soluto y ser tomadas ellas como hechos "reales", numerosos investigadores han propuesto a través de estos años diversidad de modelos matemáticos que "ajustan" las curvas teóricas a las experimentales, pero ello en detrimento de valores realistas del Coeficiente longitudinal de dispersión. Entonces, si la no correspondencia de la formula de Elder se ha derivado del hecho de que los diversos métodos de interpretación de las curvas de soluto no toman en cuenta la verdadera naturaleza del fenómeno, es factible que el error este en los métodos mismos y no en la formula de Elder. Una clave para la revisión del tema es que se analicen los efectos de la aplicación correcta de una transformación de Galileo sobre la

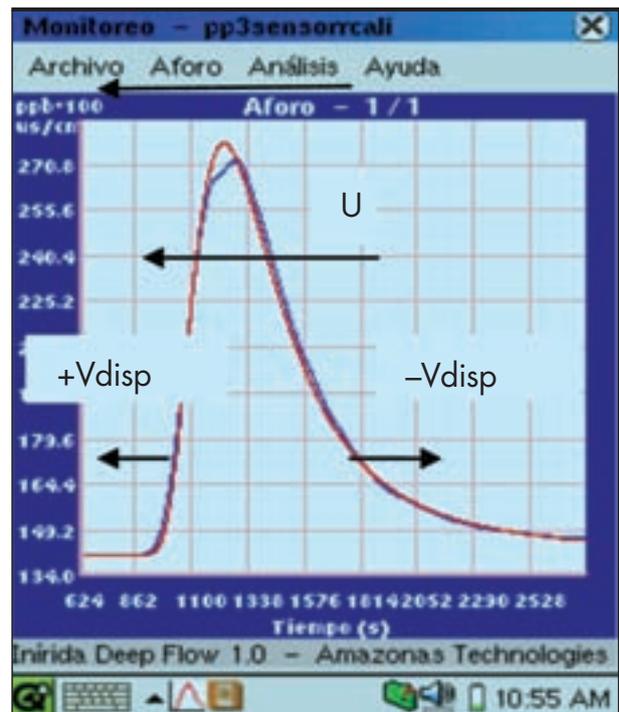


FIGURA 3. Curva asimétrica de concentración de soluto aun en flujo uniforme.

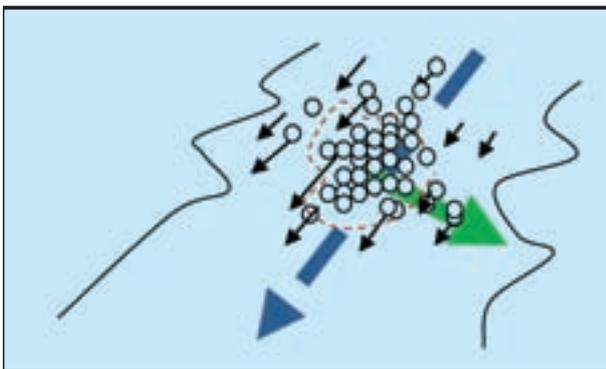


FIGURA 4. Movimiento difusivo-dispersivo en dos ejes.

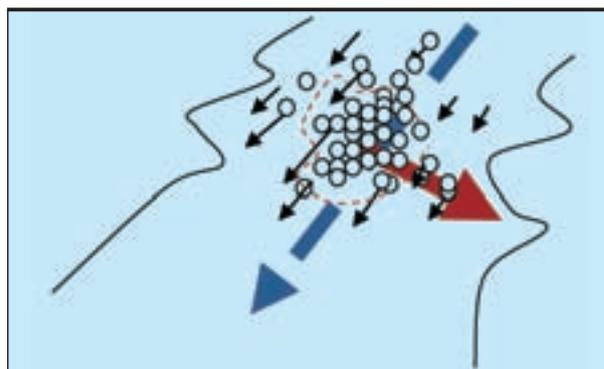


FIGURA 5. Movimiento térmico-dispersivo en dos ejes.

descripción completa del fenómeno, especialmente lo que tiene que ver con la noción correcta de dimensionalidad del fenómeno dispersivo y la naturaleza de las ecuaciones utilizadas, que no se acoplan. Este acople será posible utilizando un coeficiente longitudinal de dispersión función del tiempo, $E(t)$. De esta forma se mostrara como las ecuaciones modificadas no solo describen apropiadamente las curvas experimentales sino también como se acoplan a la realidad física de implica que el flujo es no uniforme y que esta condición no es necesaria para mantener la esencia Fickiana de las ecuaciones utilizadas.

4. UN MODELO ALTERNO QUE DESCRIBE LAS CURVAS REALES DE TRAZADOR A PARTIR DE UN CONCEPTO NO ESTACIONARIO DEL PROCESO

Dado que la estructura matemática de las ecuaciones (3), (4) y (5) es esencialmente correcta, una posible explicación al comportamiento “anómalo” de las curvas experimentales es que se haya incurrido en un problema de interpretación dimensional, relacionada con una aplicación limitada y defectuosa del principio de relatividad clásica de Galileo. Se tratará de mostrar que en toda circunstancia el proceso básico del transporte de masa en los flujos naturales ocurre en realidad en dos coordenadas (longitudinal y transversal) y no en una sola (longitudinal) implicando un error la aplicación simple de la ecuación mono-dimensional. Entonces, en una primera fase una vez hecha la inyección de soluto, la dispersión se desarrolla porque la difusión turbulenta que opera también transversalmente (flecha verde) pone de manera aleatoria partículas de trazador en el campo de velocidades distribuida en el flujo (flechas negras).

Esto genera un desperdigamiento Gaussiano de la distribución de las partículas en el eje longitudinal (flecha azul) en la que existe una separación aleatoria de cada par de partículas con un patrón Browniano. (Constain et al, 2006). Figura 4. Una vez logrado el equilibrio químico a lo ancho del flujo, el mecanismo difusivo transversal cesa su rol principal en este proceso, pero esto no quiere decir de forma alguna que el movimiento transversal aleatorio cese, pues hay un mecanismo que lo sigue soportando: la transferencia irreversible de calor que eyecta entropía hacia los alrededores. Es el efecto “Soret” en el que para sistemas en desequilibrio un efecto de flujo de calor acopla a un efecto de flujo de materia (flecha roja), de acuerdo al principio de Gibbs-Duhem de la termodinámica. (Prigogine et al, 1996). Figura 5.

Esto ocurre hasta que el proceso se extingue con la obtención del equilibrio termodinámico en todo el volumen ocupado

por el soluto. Entonces, la naturaleza bidimensional de la dispersión en los flujos turbulentos es un hecho inevitable y permanente. La solución trivial sería usar las ecuaciones bi-dimensionales con sus correspondientes dificultades de interpretación y resolución matemática. La solución no trivial para acoplar esta situación es definir un coeficiente longitudinal de dispersión, E , como función del tiempo. Esto puede ser así porque la *variación temporal* en las ecuaciones diferenciales equivale a *variaciones espaciales* de cualquier naturaleza. De esta forma la ecuación mono-dimensional de Fick con un tal coeficiente función del tiempo puede representar apropiadamente el movimiento bi-dimensional descrito.

Es posible mostrar que un coeficiente de transporte función del tiempo implica una velocidad media del flujo con la siguiente forma (Constain et al, 2002):

$$U = \frac{1}{\phi(t)} \sqrt{\frac{2E(t)}{\tau}} \quad (23)$$

Aquí τ es el tiempo característico de dispersión y $\phi(t)$ es una función que describe el grado de asimetría de la curva de concentración. La función $\phi(t)$ que aparece en esta ecuación es en realidad una función de estado y por lo tanto da cuenta de la evolución termodinámica de la pluma de soluto. Será sensible al momento en que la difusión transversal desaparece y la transmisión de calor irreversible toma su lugar. En otro artículo del autor se demuestra detalladamente que esto ocurre para $\Phi=0.38$. (Constain et al, 2005). Figura 6.

5. DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA DE CÁLCULO DEL TRANSPORTE CON BASE EN UNA VISIÓN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA LOS PARÁMETROS DE TRANSPORTE

Cálculo del Coeficiente longitudinal de dispersión

Para un análisis integral del fenómeno hidráulico, de transporte de masa y de la geomorfología de un cauce se parte del hecho de que se debe investigar cada caso en particular con trazadores. Estas son sustancias que actúan de forma parecida a las moléculas de agua, que en lo posible deben ser inertes y de disipación muy rápida para no causar impactos ambientales de importancia.

La ecuación (23) de velocidad media basada en la integración de conceptos hidráulicos y de transporte es válida incluso para régimen de flujo no uniforme, a diferencia de la ecuación clásica de Chezy, ya que la heterogeneidad de las condiciones dinámicas impuestas a la mezcla de soluto conducen a una mejor precisión de los parámetros involucrados. Para desarro-

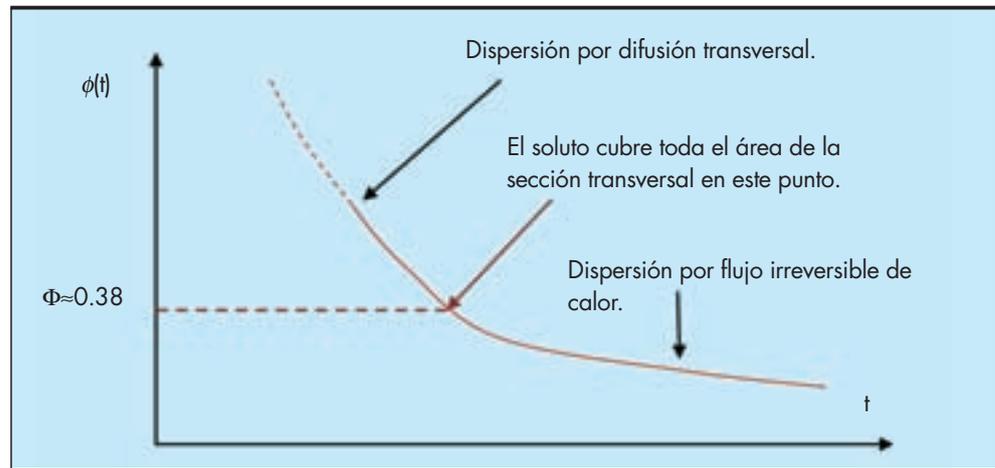


FIGURA 6. Forma aproximada de la función $\phi(t)$.

llar una metodología específica a partir de estas ideas nuevas interesa en primer lugar despejar el Coeficiente E :

$$E = \frac{\phi^2 U_x^2 \tau}{2} \quad (24)$$

Se puede demostrar que la relación que existe entre τ como tiempo característico y t como tiempo general (variable independiente) está determinada por la distribución de Poisson aplicada al movimiento totalmente aleatorio (estadístico) de las partículas del trazador. (Constain et al, 2006) Esta relación numérica es.

$$\frac{\tau}{t} = \beta \approx 0.215 \quad (25)$$

Por lo tanto la ecuación anterior queda:

$$E = \frac{\phi^2 U_x^2 \beta t}{2} \quad (26)$$

Cálculos prácticos de U y ϕ

En la práctica, tanto U como ϕ y la misma t se miden en la curva de soluto en examen, conociendo la distancia desde el punto de inyección súbita y el punto de medición fijo en la orilla y estableciendo el tiempo transcurrido entre estos dos eventos. En la Figura 7 se muestra una pantalla de un instrumento de software útil para medición y análisis de cauces con el tiempo como abscisa ($T=segundos$). En esta pantalla se muestra el instante de inyección súbita de una masa determinada de trazador mediante una pequeña flecha roja. La curva de trazador (sal común en el caso mostrado) se sobrepone en una concentración de fondo C_0 , correspondiente a la concentración iónica de los aportes diversos del lecho y la escorrentía. La velocidad promedio del flujo U se calcula entonces por la razón entre la distancia ΔX (dato conocido de entrada) y el tiempo entre la flecha roja y el pico de la curva. En la Figura 8 se muestra la misma pantalla pero con los cálculos para la función Φ . (Constain et al, 2007).

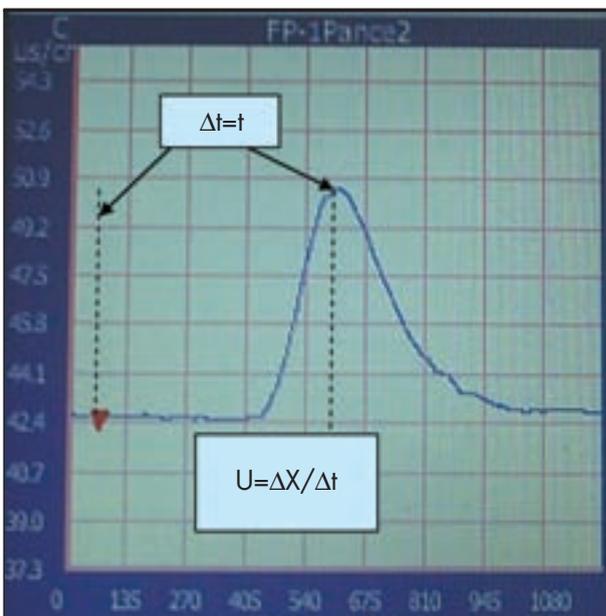


FIGURA 7. Medición práctica de los parámetros importantes de una caracterización de un flujo con trazador.

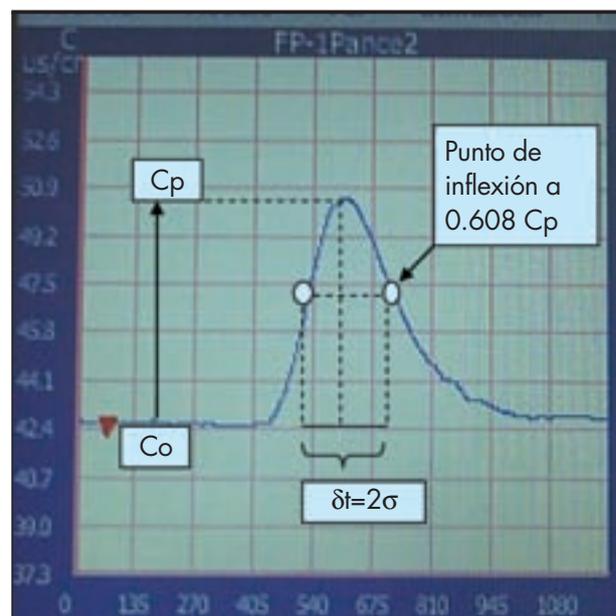


FIGURA 8. Medición práctica de Φ a partir de los datos de la curva de trazador.

$$U = \frac{\Delta X}{\Delta t} \quad (27)$$

De la teoría Fickiana básica y de la definición temporal para E se tiene que:

$$\delta t = 2\sigma = 2\sqrt{\beta} \phi t \quad (28)$$

Por lo tanto Φ se calcula a partir de la siguiente formula con todos los datos conocidos, ya que δt y t se miden en la curva y $\beta=0.215$:

$$\phi = \frac{\delta t}{2 t \sqrt{\beta}} \quad (29)$$

Por lo tanto estos datos numéricos se aplican a resolver la definición (26).

Cálculo del tiempo de llegada de las partículas de trazador

La varianza sirve para determinar los puntos “extremos” de la curva real de trazador, en especial el punto más “avanzado” correspondiente a la llegada de las primeras partículas del soluto. Se sabe de la estadística matemática que un 95% del área de la curva Gaussiana se cubre aproximadamente con dos desviaciones a partir de centro de la curva. Esta indicación sirve para calcular en avance el tiempo en el cual aparecerán las primeras partículas de trazador. Entonces si se llama a “t1” como el tiempo contado desde el centro de la curva en que aparecen las primeras partículas de soluto dispersándose, se tendrá como en la Figura 9.

Se tiene entonces:

$$t_1 = 2 \times \sqrt{\beta} \phi t \quad (30)$$

$$T_{\text{primeras partículas}} = T_p \approx t - t_1 = t(1 - 2 \times \sqrt{\beta} \phi) \quad (31)$$

Ahora, es necesario calcular el “punto extremo” de las últimas partículas. Se debe tener en cuenta que la curva vista desde la orilla presenta una asimetría debido a la composición de Galileo sobre las velocidades participantes. Este efecto se mide por la función Φ , a partir de la siguiente fórmula que permite calcular la razón entre los tiempos internos de la

curva, $t1$ y $t2$. Esta fórmula se deduce de la relación entre tiempos y velocidades para la composición de Galileo si $\phi \neq 1$ (Constain et al, 2003).

$$\frac{t_2}{t_1} \approx \frac{1+\phi}{1-\phi} \quad (32)$$

Por lo tanto:

$$t_2 \approx \left(\frac{1+\phi}{1-\phi}\right) \times t_1 = 2 \times \left(\frac{1+\phi}{1-\phi}\right) \times \sqrt{\beta} \phi t \quad (33)$$

Este tiempo medido desde el punto de vista del observador será:

$$T_{\text{últimas partículas}} = T_u \approx t + t_2 \quad (34)$$

Estos cálculos aproximados serán de gran importancia para los estudios de calidad de aguas en los que además del tiempo medio de transporte, t , es necesario conocer a $t1$ y $t2$.

6. REDEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN DE FICK Y CÁLCULOS DE PREDICCIÓN PARA LA CONCENTRACIÓN DE SOLUTO $C_p(t)$ Y $\phi(t)$

Si se parte de la ecuación (26) y se reemplaza en la ecuación clásica de Fick (3) se llega a una nueva relación para la concentración del soluto en función del tiempo. Aquí el sumando C_o es la concentración salina de fondo del cauce considerado.

$$C(t) = \frac{M}{Q \times \phi \times t \times \sqrt{2\pi\beta}} e^{-\frac{(X-Ut)^2}{2\beta t^2}} + C_o \quad (35)$$

Esta ecuación que resulta de definir al Coeficiente Longitudinal de dispersión como función del tiempo, y por lo tanto acoplado a la realidad bidimensional del proceso de transporte difusión-dispersión, representa de forma muy precisa las curvas experimentales de trazador, a diferencia de la ecuación clásica, como ya se ha señalado. Entonces, a partir de la ecuación modificada de Fick anterior se puede expresar el valor para la concentración pico, según la siguiente ecuación:

$$C_p = \frac{M}{Q \phi t \sqrt{2\pi\beta}} \quad (36)$$

Reubicando a Φ :

$$C_p \phi = \frac{M}{Q t \sqrt{2\pi\beta}} \quad (37)$$

Multiplicando el numerador y denominador por α un factor de utilidad para aplicar las dos definiciones por aparte:

$$C_p \phi = \frac{M \alpha}{Q \alpha t \sqrt{2\pi\beta}} \quad (38)$$

Operando algebraicamente el tiempo:

$$C_p \phi = \frac{M \alpha}{Q \alpha t^{(3)} \sqrt{2\pi\beta}} \quad (39)$$

Entonces:

$$C_p \phi = \frac{M \alpha t^{-\frac{3}{2}}}{Q \alpha t^{(3)} \sqrt{2\pi\beta}} \quad (40)$$

Separando:

$$C_p \phi = \frac{M}{Q \alpha t^{(3)} \sqrt{2\pi\beta}} \times \alpha t^{-\frac{3}{2}} \quad (41)$$

Definiendo por aparte:

$$\phi(t) = \frac{M}{Q \alpha 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} \quad (42)$$

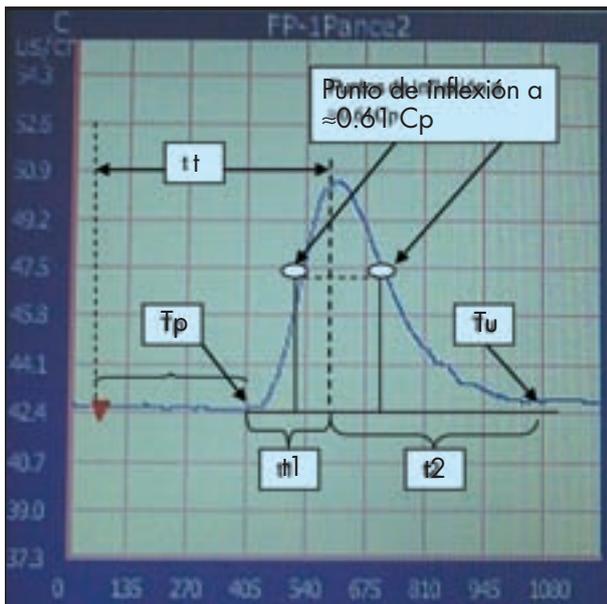


FIGURA 9. Cálculo de los tiempos extremos de una curva de soluto.

Y:

$$C_p(t) = \alpha t^{-\frac{2}{3}} \quad (43)$$

El coeficiente α se obtiene examinando cada caso experimental. Para ello se calcula primero la función temporal específica para el caso i y luego se mide la concentración pico correspondiente de la curva de trazador y se utiliza la siguiente ecuación:

$$\alpha_i \approx \frac{C_p(t_i)}{(t_i)^{\frac{2}{3}}} \quad (44)$$

7. ANÁLISIS DE LOS DATOS ORIGINALES DE UNA EXPERIMENTACIÓN CON TRAZADOR DOCUMENTADA POR H.B. FISCHER EN 1966

Consideraciones generales

Para verificar la teoría propuesta fue escogido un experimento detallado realizado por H.B. Fischer en el canal calibrado de 40 metros con pendiente ajustable y recirculación, del W.M Keck Laboratory de Caltech en 1966 (Fischer, 1966), Figuras 10 y 11. Este es un canal rectangular de paredes de plástico y lecho de acero inoxidable. Tiene un recorrido uniforme desde 0.0 m hasta los 38.6 m. Para el experimento en cuestión se utilizó una pendiente de 0.0002 ajustada mediante los aparejos mecánicos de precisión del laboratorio. El experimento denominado por su autor como "Series" 2700 consistió en ocho vertimientos ("Run") con sal común. Cuatro (2700 a 2704) hechos a $X1= 14.06 m$ y otros cuatro (2705-2708) hechos a $X2= 25.06 m$. Para todos los vertimientos-salvo la distancia-las demás condiciones del experimento fueron mantenidas iguales. Para pasar de una "serie" a otra (de $X1$ a $X2$) se movió el dispositivo inyector de trazador, en lugar de mover las sondas para no modificar la calibración. En realidad para cada distancia se promediaron los cuatro (4) vertimientos, así que el dato dado para cada serie es un promedio. Para este experimento se obtuvo una profundidad de la lamina de agua de $h= 0.128 m$ y una velocidad media del flujo de $U=0.362 m/s$. La profundidad de cada experimento se controló con un indicador ("pointer") especial colocado sobre la lamina de agua mientras que la velocidad del flujo fue medida con un tubo pitot tipo Prandtl.



FIGURA 10. Vista panorámica del canal de 40 metros.

Instrumentación del experimento

El equipo de procesamiento electrónico de las señales desde los sensores de conductividad en el canal de 40 metros se muestra en la Figura 12.

En 1966 la instrumentación electrónica de precisión era de gran volumen como puede observarse en la Figura anterior. Se utilizó en esa oportunidad un equipo "Sanborn recording system series 150". Este equipo recogía las señales electrónicas por seis canales independientes desde los sensores. Luego esta información era procesada por un computador digital. Los sensores fueron colocados según una distribución especial en la sección transversal del canal para tener una información representativa de la distribución del trazador, similarmente a como aparece en el arreglo de la Figura 13.

Los sensores de conductividad se hicieron especialmente para obtener una constante de sensibilidad acorde con los requerimientos de la instrumentación electrónica. Fueron tres electrodos alineados, el electrodo central con potencial de señal mientras los dos electrodos externos estaban a tierra (referencia) dando un excelente arreglo sin ruido. Su material fue de platino de alta pureza embebido en un plástico especial. Sus dimensiones fueron 1/8 x 1/8 x 0.01 pulgadas. Figura 14.

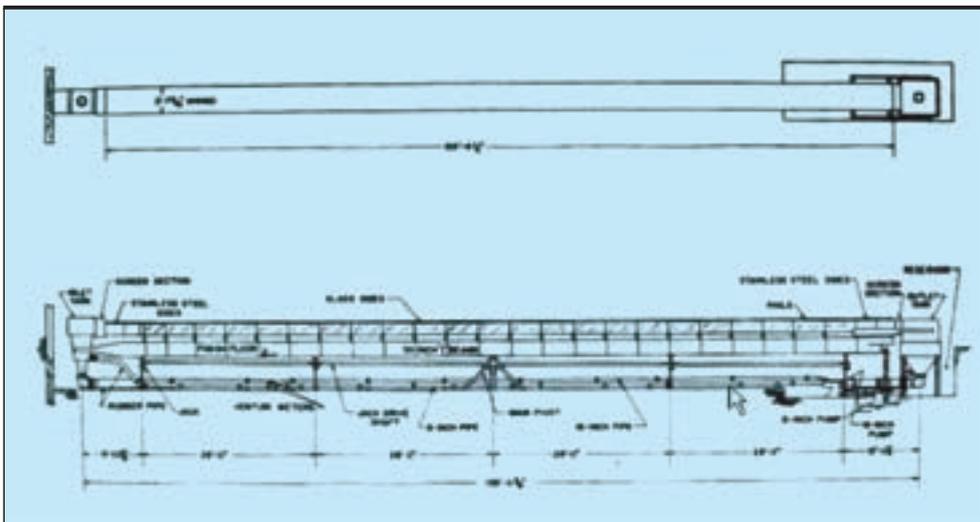


FIGURA 11. Plano esquemático de las facilidades del canal.

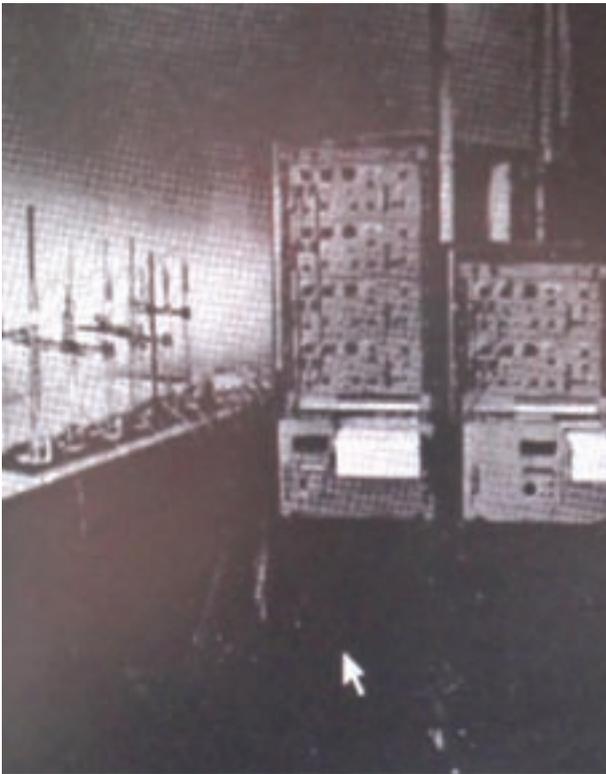


FIGURA 12. Instrumentación electrónica multicanal.



FIGURA 13. Colocación fija de los electrodos en un experimento sobre el canal.

Método de inyección del trazador

La sustancia trazadora iónica sal común se inyectó súbitamente mediante un aparejo especial semejante al mostrado en la Figura 15.

Medición de velocidades

Las velocidades puntuales en el canal de 40 metros fueron hechas por un tubo Prandtl-Pitot estático de 1/8 de pulgada de diámetro, con una cabeza de apertura dinámica de 0.042 pul-

gadas. Su calibración se realizó con transductores de presión y con los datos hidráulicos del canal. La salida eléctrica se obtuvo de dispositivos magnéticos acoplados al medidor, y su valor se maneja a través del registrador electrónico "Sanborn" lo mismo que los datos de conductividad. La Figura 16 muestra a la derecha el montaje del tubo Prandtl al centro un indicador de precisión de la profundidad de la lámina de agua.

Método utilizado en el experimento original

El experimento básicamente estaba orientado a lograr de manera rápida una condición de "Mezcla completa" en el flujo del trazador para los estudios requeridos. Por lo tanto para el experimento 2700 esta canaleta de la Figura 15 ocupaba todo el ancho del canal. De esta forma el trazador inyectado alcanzaba mezcla ideal en toda la sección transversal del flujo de manera casi instantánea. La masa de trazador para cada vertimiento fue la misma ya que la canaleta se llenaba en las dos oportunidades con la misma cantidad de solución conductora.

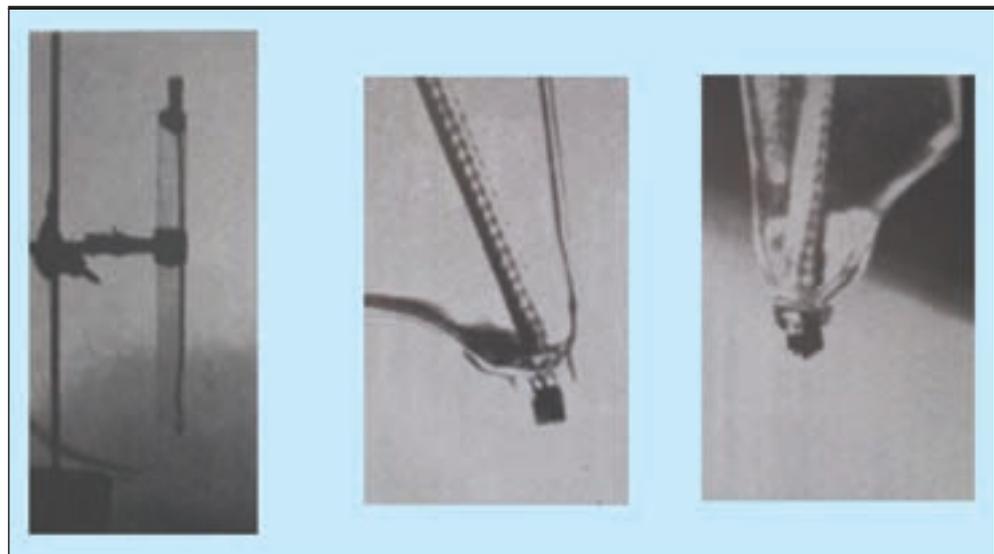


FIGURA 14. Detalle de los electrodos de conductividad.



FIGURA 15. Método de inyección del trazador en el flujo.



FIGURA 16. Medición de la velocidad y la profundidad.

Datos del Experimento

Los Datos hidráulicos y mecánicos básicos del canal en la “corrida” 2700 se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Especificación
Condiciones del canal	L(max)= 40 m W= 1.09 m h=0.128 m R=0.104 m A= 0.140 m ² S= 0.0002 Ux=0.362 m/s Q= 50.8 l/s
Trazador	Sal común (NaCl) E= 0,0236 m ² /s (Método “Routing”)
Medidores de Conductividad	Seis (6) para asegurar una medición precisa en la sección transversal Sensibilidad de los sensores: 0.5 mgr/l Rango: Hasta 100 mgr/l
Medidores de velocidad	Tubos de Pitot estáticos 1/8 pulgada
Método de vertimiento	Súbito en toda la sección a 14.08 m primero y a 24.8 m después

TABLA 1. Información básica del canal.

Curvas de trazador en los dos sitios de medición

Las graficas de los dos vertimientos se muestran en la Figura 17. Hay que notar que para el tipo de experimento que realizó H.B. Fischer no era necesaria la información de la conductividad real y solo utilizo datos relativos, asegurando masas iguales de trazador en cada vertimiento. De esta forma aparece el eje de las ordenadas en unidades arbitrarias. El resultado de *E* por Fischer se resalta en amarillo.

8. APLICACIÓN DE LAS NUEVAS ECUACIONES A UN EXPERIMENTO ESCOGIDO

En seguida se analizan los diversos aspectos del estudio y se aplican los nuevos criterios y formulas explicadas en este artículo.

Cálculo de los valores de $\phi(t)$ para las dos curvas de trazador

Para este ejercicio se hacen las graficaciones correspondientes sobre las dos curvas de trazador específicas, tal como se muestra en la Figura 18.

Se utiliza la ecuación (29) en cada curva:

Curva a X1=14.06 m.

$$\phi_1 = \frac{\delta t_1}{2 t_1 \sqrt{\beta}} = \frac{4.71}{2 \times 38.5 \times 0.464} \approx 0.131$$

Curva a X2=25.06 m.

$$\phi_2 = \frac{\delta t_2}{2 t_2 \sqrt{\beta}} = \frac{8.04}{2 \times 68.8 \times 0.464} \approx 0.126$$

Cálculo de la masa vertida en cada experimento de trazador

El dato de la masa es importante pues es indispensable para la modelación teórica de las curvas de trazador. Sin embargo Fischer no documentó este dato pues para el objetivo propuesto en la tesis se consideró que se podía trabajar con uni-

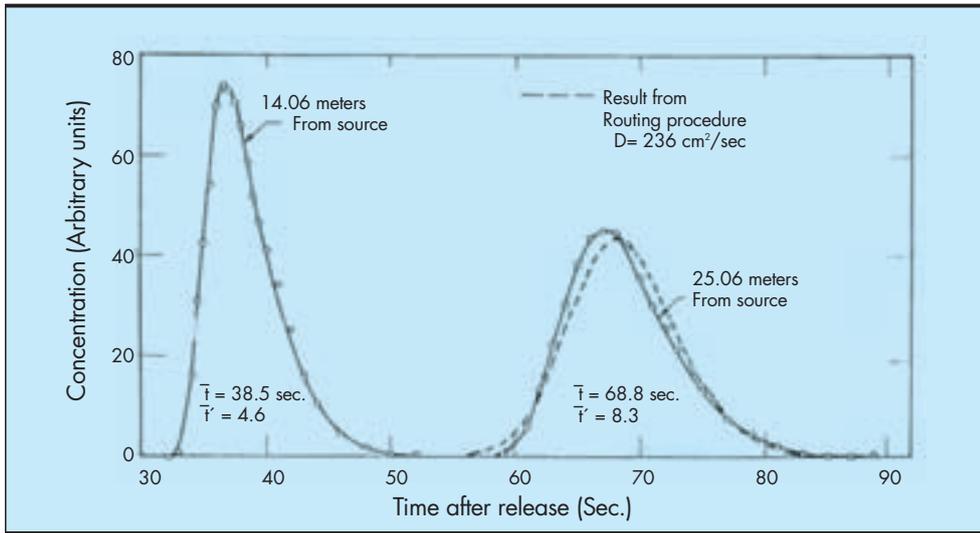


FIGURA 17. Graficación original de los dos vertimientos de sal en el canal de 40 m.

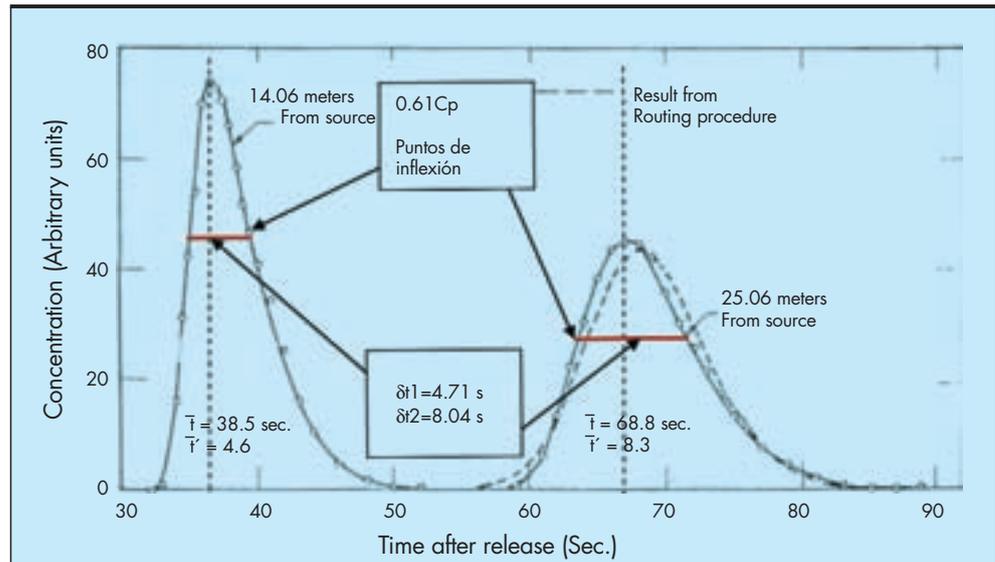


FIGURA 18. Graficaciones para calcular los valores de $\Phi(t)$ en cada curva.

dades arbitrarias de masa y por lo tanto de concentración de soluto. Esto implica de entrada un inconveniente y hay que investigar los datos discretos congruentes para ingresarlos luego en las formulas en el Excel. Se buscan las tablas de datos de la conductividad numérica relativa que se dan al final del reporte KH-R-12. Pero se encuentra que ellos tampoco dan la información directa que se buscaba, pues son simplemente la salida de los instrumentos calibrados a máxima deflexión del medidor utilizado. La clave es determinar que magnitudes son proporcionales y entonces ajustarlas debidamente para poder comparar las curvas teóricas con las experimentales. Se desconocen tanto la masa, M de trazador como la Concentración pico (altura), C_p del trazador, pero su razón si se conoce pues corresponde al siguiente producto de datos ya sabidos, de acuerdo con la ecuación (36).

$$\frac{M}{C_p} = Q \phi t 1.16 = Cte$$

Entonces, basta con fijar arbitrariamente un valor de uno de los parámetros desconocidos y se puede calcular el valor

del otro. Esto vale tanto para los datos de los experimentos de Fischer como para el ajuste de las ecuaciones de Modelacion. Por ejemplo, de manera completamente arbitraria se escoge un valor de la masa que sea razonablemente significativa para el caudal manejado, por ejemplo $M=40.5 \text{ gramos}$. Se calcula en seguida para cada serie de datos (a $X1$ y a $X2$) los valores de C_{p1} y C_{p2} :

$$\frac{M}{C_{p1}} = Q \times \phi_1 \times t_1 \times 1.16 = 50.8 \times 0.131 \times \frac{14.06}{0.362} \times 1.16 = 300 \text{ litros}$$

$$\frac{M}{C_{p2}} = Q \times \phi_2 \times t_2 \times 1.16 = 50.8 \times 0.126 \times \frac{25.06}{0.362} \times 1.16 = 514.0 \text{ litros}$$

Por lo tanto, con $M=40.5 \text{ gramos}$ se tiene:

$$C_{p1} = \frac{M}{300} = \frac{40500}{300} = 135 \text{ Mgr/l}$$

$$C_{p2} = \frac{M}{514} = \frac{40500}{514} = 78.8 \text{ Mgr/l}$$

Esta misma proporción tiene que ser aplicada a los datos arbitrarios (pero proporcionales) de las tablas numéricas del reporte KH-R-12. Para ajustar esto se buscan en cada serie el valor máximo (C_p) y se halla la constante por la cual debe multiplicarse para igualar al C_p hallado anteriormente: Así, para la serie a $X1=14.06\text{ m}$ el valor máximo $Cp1(\text{arbitrario})=73.3$ pero debe quedar igual a $Cp1(\text{absoluto})=135.0\text{ Mgr/l}$ Esto quiere decir que cada número de esta serie debe ser multiplicado por este mismo factor, k para ajustar la serie.

Aquí $k1$ vale: $k_1 = \frac{135}{73.3} = 1.842$

Ahora para la otra serie a $X2=25.06\text{ m}$ el valor máximo $Cp2(\text{máximo})=106.6$ pero debe transformarse a $Cp2(\text{absoluto})=78.8\text{ Mgr/l}$.

Aquí $k2$ vale: $k_2 = \frac{78.8}{106.6} = 0.739$

Se muestran en la Tabla 2 de datos ajustados con estos multiplicadores para los dos vertimientos.

Estos datos numéricos discretos ajustados se grafican en la Figura 19 mediante una rutina apropiada de Excel. A partir de estos datos específicos de concentración para el experimento en el canal de 40 metros en Caltech es posible realizar enseguida los modelamientos teóricos que se requieren para comprobar las diferentes hipótesis.

Modelación usando la ecuación de Fick clásica (con Coeficiente longitudinal de dispersión constante) con los datos dados por H.B. Fischer

Con los datos que da Fischer para este experimento se modela la fórmula clásica de Fick y con los datos correspondientes consignados originalmente en el informe KH-R-12.

$$C(x,t) = \frac{M}{A\sqrt{4tE}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4Et}}$$

$X1=14.06\text{ m}$

Con $E=0.0256\text{ m}^2/\text{s}$, con $A=0.140\text{ m}^2$ y con $U=0.362\text{ m/s}$.

Tiempo en $X2=25.06\text{ m}$ después del vertimiento	Concentración promedio en unidades arbitrarias y su valor ajustado. (Mgr/l)	Tiempo en $X1=14.06\text{ m}$ después del vertimiento.	Concentración promedio en unidades arbitrarias y su valor ajustado. (Mgr/l)
57	0.0→0.0	32	0.0→0.0
59	0.7→0.52	33	1.5→2.76
61	13.4→9.90	34	16.2→29.8
62	31.4→23.2	35	42.4→78.1
63	52.4→38.7	36	70.0→128.9
64	72.5→53.6	36.5	73.3→135.0
65	91.5→67.6	37	72.9→134.3
66	102.1→75.5	38	66.0→121.6
67	106.6→78.8	39	51.7→95.2
68	105.3→77.8	40	41.0→75.5
69	97.1→71.8	41	34.3→63.2
70	84.4→62.4	42	25.6→47.2
71	71.6→52.9	43	16.1→29.7
72	61.4→45.4	44	10.9→20.1
73	50.6→37.4	46	4.7→8.7
74	41.1→30.4	48	1.7→3.13
75	32.1→23.7	50	0.5→0.92
76	25.0→18.5	52	0.2→0.37
77	18.4→13.6		
79	10.3→7.61		
81	4.9→3.62		
83	2.0→1.48		
85	1.0→0.74		
87	0.5→0.37		
89	0.2→0.15		

TABLA 2. Distribución de concentraciones en el tiempo.

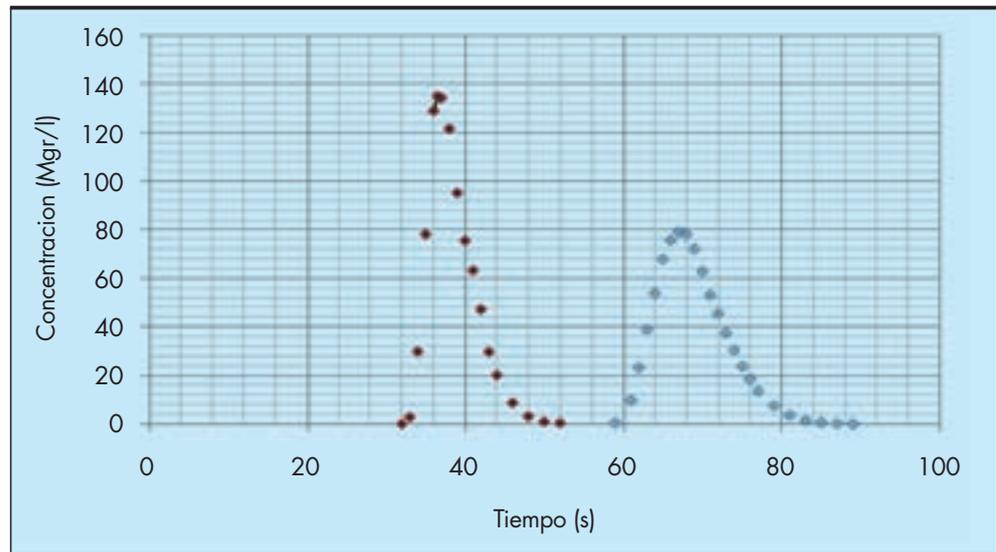


FIGURA 19. Datos numéricos experimentales ajustados.

Para este sitio se tienen los siguientes datos para ingresar en el modelo Excel que graficara el modelo teórico superpuesto a la curva experimental. Se muestra en seguida las dos modelaciones aisladas y en conjunto utilizando los datos del informe KH-R-12 y la fórmula clásica de Fick. Figura 20.

$$X2 = 25.06 \text{ m}$$

Con $E = 0.0256 \text{ m}^2/\text{s}$, con $A = 0.140 \text{ m}^2$ y con $U = 0.362 \text{ m/s}$.

Es evidente de la observación de estas curvas que, tal como ha sido advertido reiteradamente en muchas publicaciones, que ni la altura de la curva ni el grado de asimetría son reproducidas correctamente, por lo menos utilizando un valor constante del coeficiente E calculado con el método "Routing" de Fischer. La curva teórica alcanza el pico un poco después que el dato experimental indicando que el dato de velocidad tiene un pequeño desfase.

Aplicación del nuevo procedimiento

Estos datos experimentales ajustados deben ser reproducibles desde el modelo teórico usando las mismas constantes de proporcionalidad. Figura 21.

$$X1 = 14.06 \text{ m}$$

Se parte de los siguientes datos: $U = 0.362 \text{ m/s}$, $\Phi 1 = 0.131$, $Q = 50.8 \text{ l/s}$.

$$X2 = 25.06 \text{ m}$$

Se parte de los siguientes datos: $U = 0.362 \text{ m/s}$, $\Phi 1 = 0.126$, $Q = 50.8 \text{ l/s}$.

Claramente esta modelación es más exacta que la clásica de Fick. Queda en evidencia de nuevo una discrepancia con la velocidad la cual para el dato experimental de trazadores es un poco mayor que la utilizada en la ecuación. En seguida se hacen ajustes a los valores de los parámetros para mejorar el ajuste teoría-experimento.

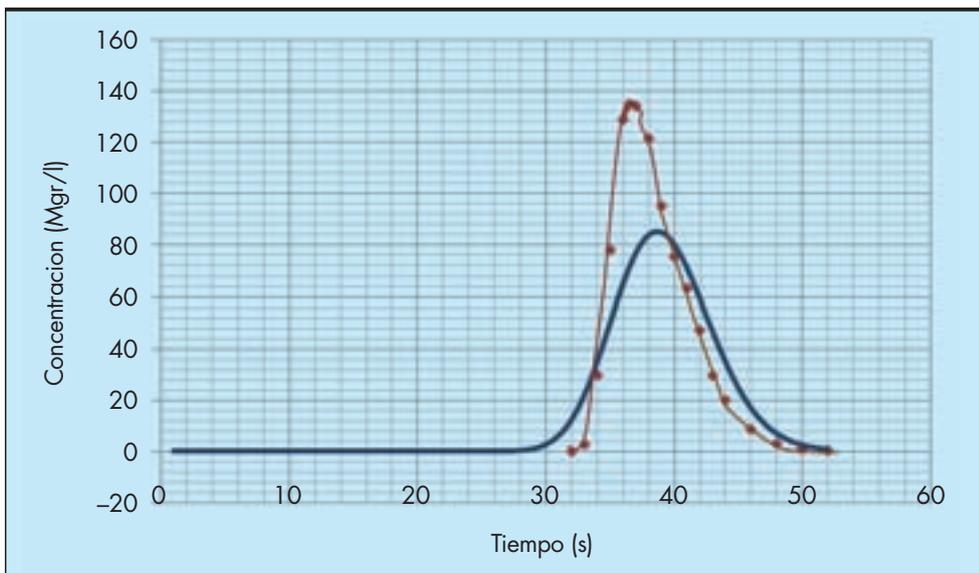


FIGURA 20A. Modelaciones individuales y en conjunto de Fick clásica.

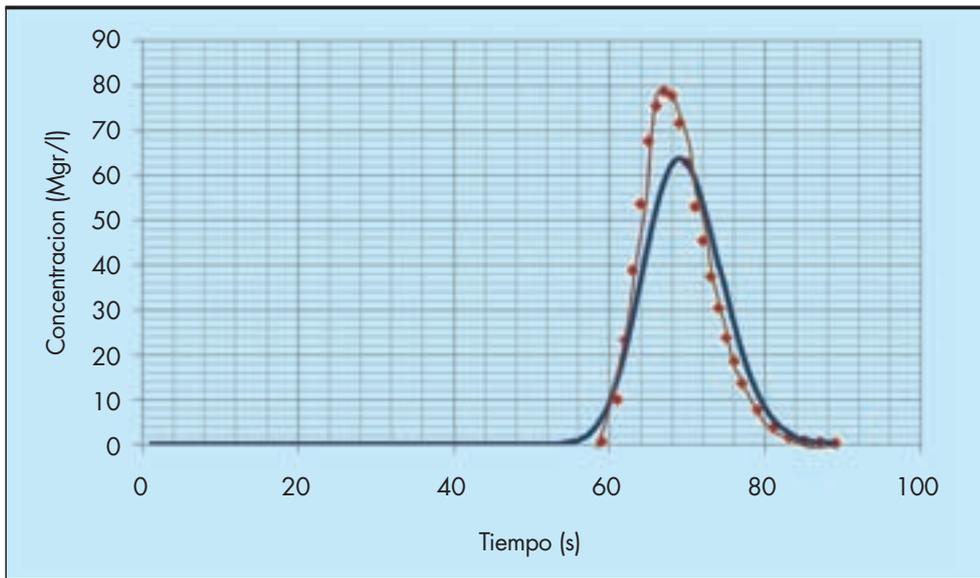


FIGURA 20B. Modelaciones individuales y en conjunto de Fick clásica.

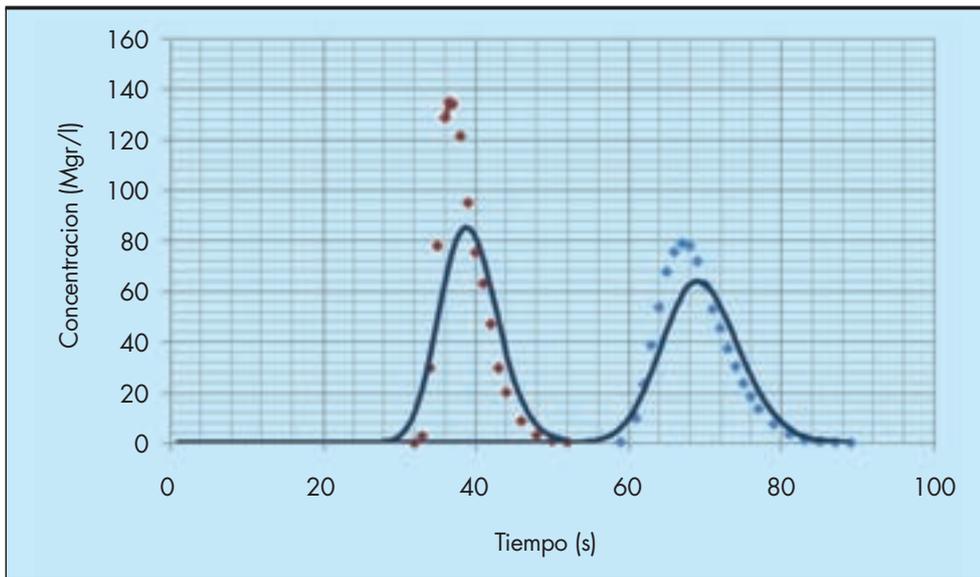


FIGURA 20C. Modelaciones individuales y en conjunto de Fick clásica.

Ajustes de los valores para obtener curvas muy ajustadas con respecto al dato experimental

La ventaja de disponer de una fórmula racional para la curva de trazador (en lugar de un procedimiento de ajuste estadístico como el "Routing") es que permite introducir pequeñas variaciones hasta que las curvas coincidan de forma óptima con el experimento, todo mediante una simple rutina de Excel. La primera modificación que se hace es aumentar la velocidad media del flujo para anular el pequeño desfase observado de las curvas teóricas con las experimentales. Estas variaciones conllevan así mismo una cierta variación de Q , $\Phi(t)$ y de $C_p(t)$ a valores consistentes. Un cuadro de tales ajustes se muestra en Tabla 3.

Las curvas logradas en Excel para estos datos ajustados, tanto en el tiempo como en el espacio se muestran a continuación en la Figura 22.

Distancia	C_p (Mgr/l)	U (m/s)	Q (l/s)	Φ	t (s)
X1=14.06 m	128.5	0.372	53.0	0.137	37.8
X2=25.06 m	75.3	0.372	53.0	0.130	67.4

TABLA 3. Ajuste de datos básicos para que la convergencia teoría experimento sea óptima.

Verificación de la fórmula de Elder

Inicialmente se verifican los coeficientes longitudinales de dispersión

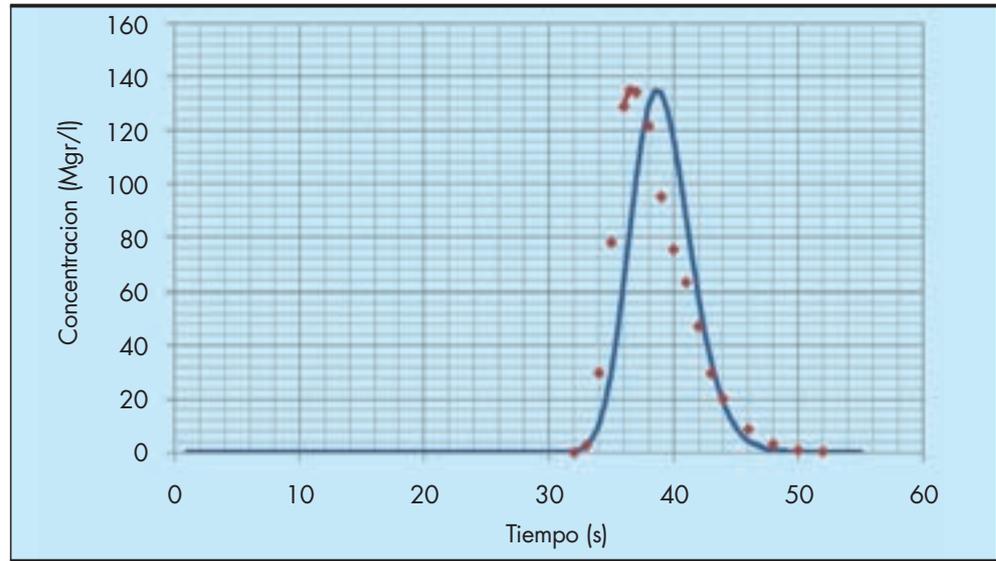


FIGURA 21A. Modelaciones con el nuevo método manteniendo la velocidad media.

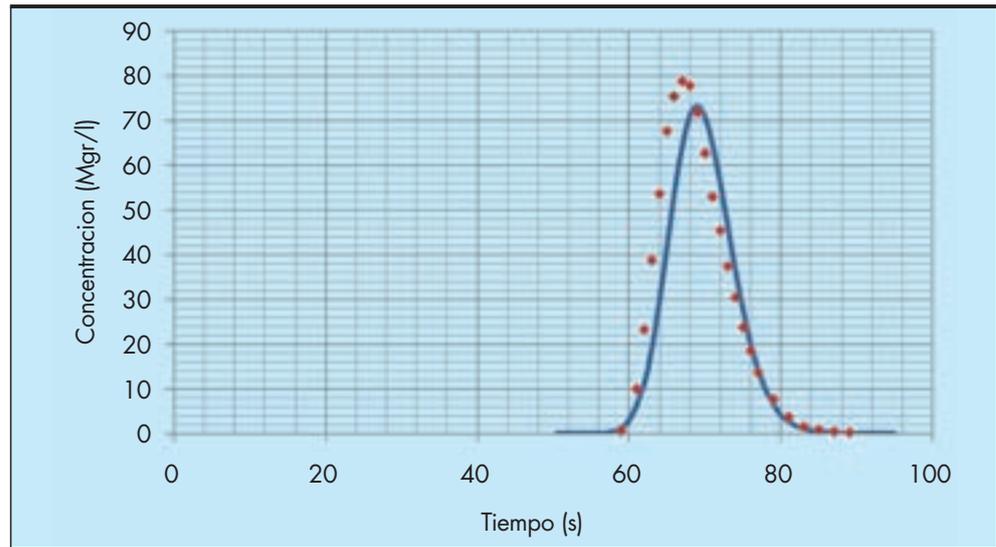


FIGURA 21B. Modelaciones con el nuevo método manteniendo la velocidad media.

$X_1=14.06$ m:

$$E_1(t) = \frac{\phi(t)^2 U^2 \beta t}{2} = \frac{(0.137)^2 \times (0.372)^2 \times 0.215 \times 37.8}{2} \approx 0.0106 \text{ m}^2 / \text{s}$$

$X_2=25.06$ m:

$$E_2(t) = \frac{\phi(t)^2 U^2 \beta t}{2} = \frac{(0.130)^2 \times (0.372)^2 \times 0.215 \times 67.4}{2} \approx 0.0169 \text{ m}^2 / \text{s}$$

El valor promedio para este parámetro es:

$$\bar{E} \approx 0.0138 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Se calcula en seguida la velocidad cortante que vale para el canal en operación:

$$U^* = \sqrt{g h S} = \sqrt{9.81 \times 0.128 \times 0.0002} = \sqrt{2.51 \times 10^{-4}} = 0.0159 \text{ m} / \text{s}$$

$$E \approx 5.93 h U^* = 5.93 \times 0.128 \times 0.0159 = 0.0121 \text{ m}^2 / \text{s}$$

Se tiene entonces un error porcentual del 14%. El valor encontrado por Fischer mediante el Método de "Routing" fue

de $0.0236 \text{ m}^2 / \text{s}$ con un error del 97%. En este caso, con condiciones ajustadas a los requerimientos originales de Elder, la coincidencia es apropiada. Sin embargo, para otro tipo de cauces es necesario investigar en que momento se debe hacer el cálculo.

Verificación de los puntos de inicio y terminación de las curvas

Este cálculo no tiene un equivalente en las teorías corrientes sobre la dispersión y se constituyen en informaciones vitales para los estudios de calidad de agua. Estos tiempos medidos desde el punto de vista del observador fijo en la orilla se pueden calcular con las ecuaciones (31) y (34) y serán en general:

$$T_{\text{Primeras partículas}} = T_p \approx t - 2\sqrt{\beta} \phi t = t(1 - 2\sqrt{\beta} \phi)$$

Y

$$T_{\text{Ultimas partículas}} = T_u \approx t + 2\sqrt{\beta} \phi \left(\frac{1+\phi}{1-\phi} \right) t = t \left(1 + 2\sqrt{\beta} \phi \left(\frac{1+\phi}{1-\phi} \right) \right)$$

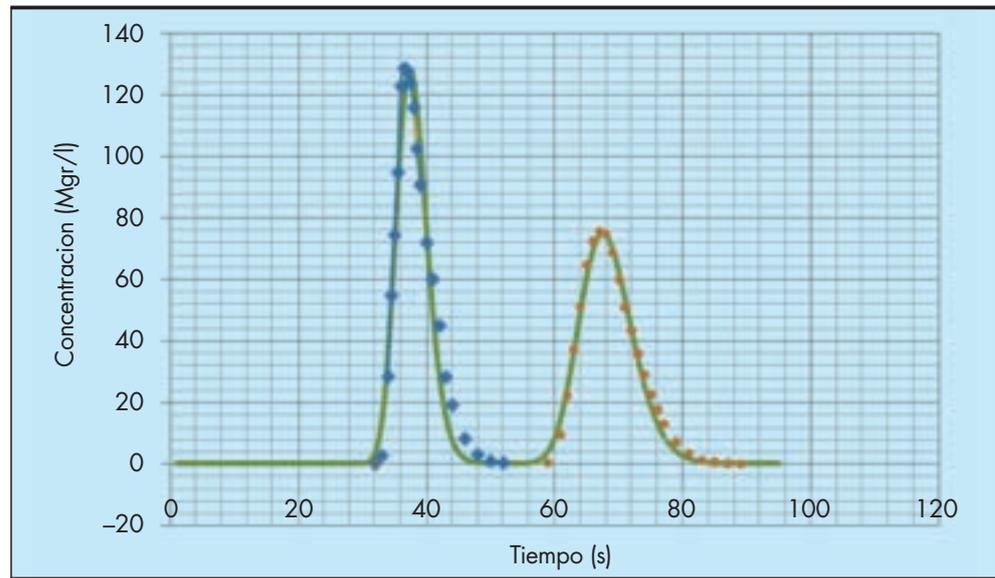


FIGURA 22A. Modelaciones ajustadas para tiempo y distancia.

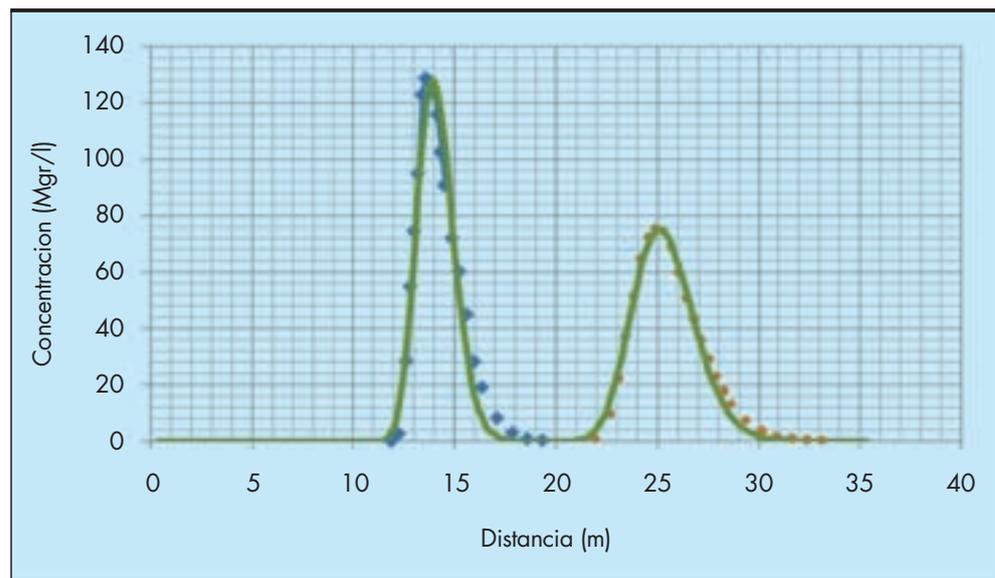


FIGURA 22B. Modelaciones ajustadas para tiempo y distancia.

Estas formulas aproximadas aplicadas a las dos curvas del experimento de Fischer son:

$$X1 = 14.06 \text{ m}$$

$$T_{P-1} \approx t_1(1 - 2\sqrt{\beta} \phi_1) = 37.6(1 - 2 \times 0.464 \times 0.137) = 32.8 \text{ s}$$

$$T_{U-1} \approx t_1 \left(1 + 2\sqrt{\beta} \phi_1 \left(\frac{1 + \phi_1}{1 - \phi_1} \right) \right) = 37.6(1 + 2 \times 0.464 \times 0.137 \times 1.317) = 43.9 \text{ s}$$

$$X2 = 25.06 \text{ m}$$

$$T_{P-2} \approx t_2(1 - 2\sqrt{\beta} \phi_2) = 67.7(1 - 2 \times 0.464 \times 0.130) = 59.5 \text{ s}$$

$$T_{U-2} \approx t_2 \left(1 + 2\sqrt{\beta} \phi_2 \left(\frac{1 + \phi_2}{1 - \phi_2} \right) \right) = 67.7(1 + 2 \times 0.464 \times 0.13 \times 1.3) = 78.3 \text{ s}$$

Los valores medidos para estos tiempos se muestran en la Figura 23.

La Tabla 4 muestra la comparación entre valores medidos y valores calculados para estos tiempos notables del transporte de soluto en el canal de Caltech.

Verificación de caudales ajustados

Se calculan los caudales que valen para los dos sitios de medición utilizando los datos obtenidos del nuevo procedimiento:

$$Q_1 = \frac{M}{C_{p1} \times \phi_1 \times t_1 \times 1.16} = \frac{40500}{128.5 \times 0.137 \times 37.8 \times 1.16} = 52.5 \text{ l/s}$$

Y:

$$Q_2 = \frac{M}{C_{p2} \times \phi_2 \times t_2 \times 1.16} = \frac{40500}{75.3 \times 0.130 \times 67.4 \times 1.16} = 52.9 \text{ l/s}$$

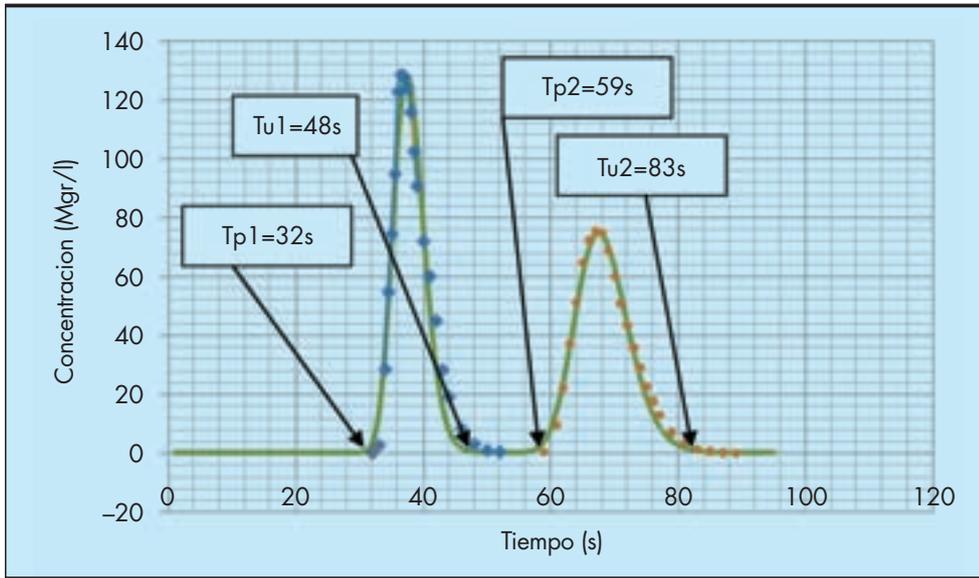


FIGURA 23. Verificación de los tiempos de llegada y permanencia de las partículas de trazador.

Serie	X1=14.06 m	X2=25.06 m
Tp calculado (s)	32.8	59.5
Tp medido(s)	32.0	59.0
Diferencia absoluta	0.8	0.5
Diferencia porcentual	≈3%	≈1%
Tu calculado (s)	43.9	78.3
Tu medido (s)	48.0	83.0
Diferencia absoluta	4.1	4.7
Diferencia porcentual	≈9%	≈6%

TABLA 4. Tiempos calculados y medidos para las primeras y últimas partículas de trazado.

Experimento	Formula α
X1=14.06 m	$\alpha_1 = \frac{128.5}{(37.8)^{-0.666}} = 1447$
X2=25.06 m	$\alpha_2 = \frac{75.3}{(67.4)^{-0.666}} = 1247$
Promedio	1347 (Mgr/l/seg(-2/3))

TABLA 5. Cálculos del parámetro α .

Predicción de Cp(X) con la distancia

El conocimiento de la concentración pico del soluto en términos de la distancia tiene gran significación para los estudios del fenómeno de la contaminación hídrica. Para analizar este tema es necesario aplicar las ecuaciones de (43) a (44). Inicialmente se debe conocer los cálculos del parámetro α para las dos series 2700 del canal de Caltech de acuerdo con los datos de la Tabla 3 mostrados en la Tabla 5.

Se establecen las ecuaciones requeridas de la siguiente forma, con el dato anterior de α y con $U=0.372$ m/s:

$$Cp(t) = \alpha \times (t)^{-\frac{2}{3}} = \alpha \times \left(\frac{X}{U}\right)^{\frac{2}{3}} = \alpha \times U^{\frac{2}{3}} \times X^{-\frac{2}{3}}$$

Por lo tanto, con distancia en metros:

$$Cp(X) \approx 697 \times X^{-\frac{2}{3}}$$

Por lo tanto la expresión buscada se grafica en conjunto con los datos experimentales en la Figura 24.

Predicción de $\Phi(X)$ con la distancia

Para el experimentador tiene sentido práctico el valor de Φ con la distancia puesto que esta función da información de cómo evoluciona la pluma de trazador desde un punto de vista energético y puede indicar cuando el soluto cubre homogéneamente la sección transversal.

$$\phi = \frac{M}{Q \alpha 1.16} \times \frac{1}{\sqrt[3]{t}} = \phi_0 \times \frac{1}{\sqrt[3]{X}} = \phi_0 \times \frac{\sqrt[3]{U}}{\sqrt[3]{X}}$$

Y entonces:

$$\phi(X) = \frac{40500}{53 \times 1347 \times 1.16} \times \frac{\sqrt[3]{U}}{\sqrt[3]{X}} = 0.490 \times \frac{\sqrt[3]{0.372}}{\sqrt[3]{X}} \approx 0.352 \times \frac{1}{\sqrt[3]{X}}$$

Por lo tanto, para el caso que se estudia la función buscada se grafica en conjunto con los datos experimentales, con distancia en metros. Figura 25.

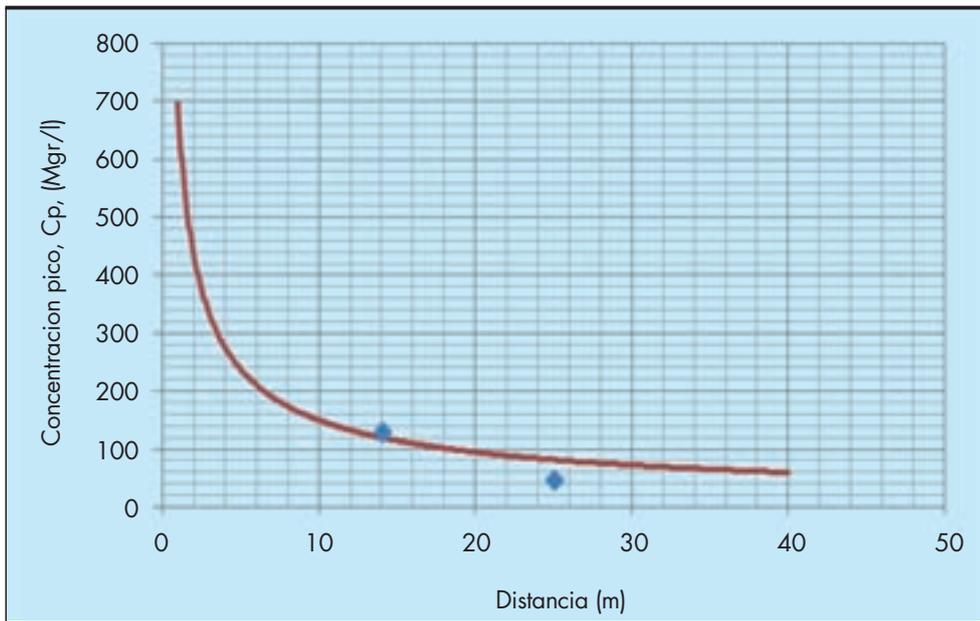


FIGURA 24. Graficación del estimativo numérico para la concentración pico con la distancia.

Una utilidad muy grande de esta función es estimar la distancia a la cual ocurre la condición de “Mezcla completa” o sea cuando el soluto se ha difundido homogéneamente en toda la sección transversal del flujo en el canal. Esta condición ocurre cuando $\phi = 0.38$, por lo tanto se plantea la siguiente ecuación:

$$0.38 \approx 0.352 \times \frac{1}{\sqrt[3]{X}}$$

Por lo tanto:

$$X_m \approx \left(\frac{0.352}{0.38} \right)^3 = 0.80 \text{ m}$$

Este resultado indica que a menos de un metro del punto del vertimiento ya se tenía el trazador distribuido uniformemente en toda la sección transversal del flujo. Esta situación

extrema de inyección completa casi instantánea se debió a que el vertimiento súbito de la solución salina se hizo con un aparato especial (canaleta) que vertió al tiempo en una línea larga a través de todo el ancho del canal.

Por último se consignan los datos finales de la revisión del experimento realizado por H.B. Fischer en 1966. Tabla 6.

9. CONCLUSIONES

1. Se analizan en este Artículo los desarrollos de G.I. Taylor sobre el fenómeno de la dispersión en flujos naturales y las restricciones que este autor puso a las ecuaciones de transporte conservativo en tubos rectos largos. Se analiza la ecuación de J.W. Elder que extiende estas formulas al caso de los cauces naturales. Especialmente

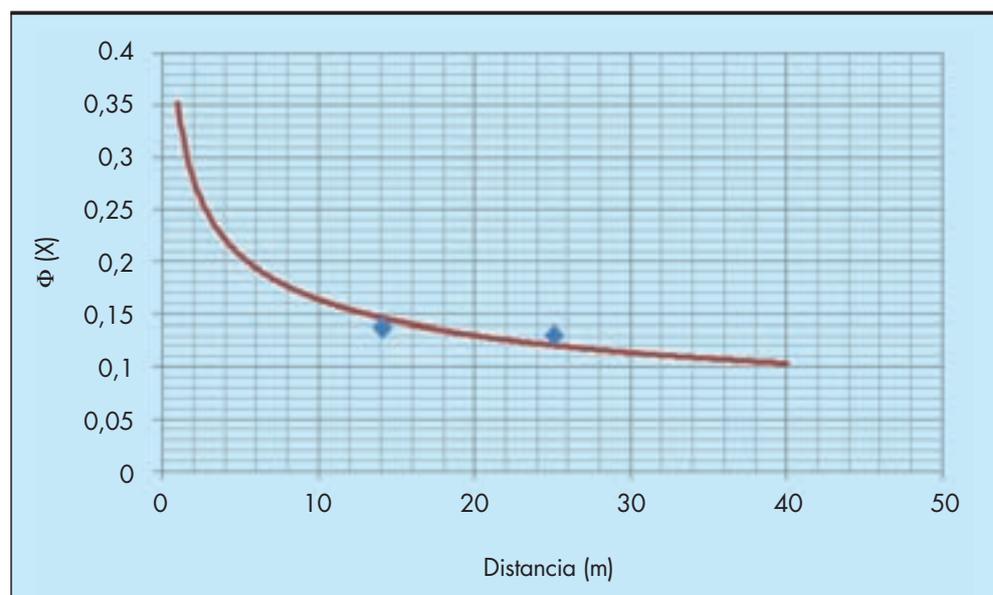


FIGURA 25. Desarrollo de la función Φ con la distancia.

Parámetros ajustados para el Canal W.M. Keck Lab. Caltech, 1966	Sitio 1 X1= 14.06 m	Sitio 2 X2= 25.06 m	Promedio
Masa M (gr)	40.5	40.5	40.5
Concentración pico Cp (Mgr/l)	128.5	75.3	-
α (Mgr/l/s ^{-2/3})	1447	1247	1347
Caudal Q (l/s)	53.0	53.0	53.0
Φ	0.137	0.130	-
Pendiente S	0.000154	0.000397	0.00028
Velocidad U (m/s)	0.374	0.370	0.372
Tiempo de transporte t (s)	37.8	67.4	-
Coefficiente Longitudinal de dispersión E (m ² /s)	0.0106	0.0169	0.0138
Longitud de mezcla Lm	Lm=1.0 m		Mezcla casi instantánea

TABLA 6. Cuadro de datos finales para las modelaciones de la revisión del experimento KH-R-12.

se hace énfasis en la paradoja que resulta al imponer condición de flujo uniforme para garantizar un transporte dispersivo simétrico en una pluma de trazador.

2. Se demuestra como desde una perspectiva general el Coeficiente Longitudinal de dispersión, E debe ser una función del tiempo para resolver esta paradoja. Esta ampliación del campo de operación de este coeficiente de transporte permite explicar los detalles de la asimetría de las curvas de trazador. Se analiza como la dependencia temporal de este parámetro tiene profunda relación con el mecanismo mismo por el cual un observador fijo en la orilla del flujo ve la pluma sesgada (asimétrica) debido a la composición de velocidades que se desprende del principio de relatividad mecánica de Galileo y por lo tanto depende del tiempo al ser sensible a la variación de la velocidad de difusión transversal.
3. Se explica como la ecuación de Elder para calcular el Coeficiente Longitudinal de trazador sigue siendo cercana a la realidad, a pesar de las diversas razones que se dieron para restringir su posible rango de aplicabilidad. Se analizan las razones por las cuales esta aproximación es correcta y más bien los métodos usados para "calibrarla" están en error al tratar de involucrar la asimetría de las curvas de trazador como algo real.
4. Se propone un método alternativo que se basa en una visión amplia de la dispersión como un fenómeno bidimensional descrito por una ecuación clásica de Fick con el coeficiente de transporte función del tiempo y por lo tanto coherente con el fenómeno que lleva a la asimetría en las curvas reales de trazador. Se explica cómo este nuevo método además de ser un tratamiento integral y preciso del fenómeno de la dispersión, permite

ser aplicado en casos prácticos con la sola ayuda del programa Excel lo cual constituye un valioso recurso para el especialista en este campo de la técnica que no va a requerir complejos programas especiales para resolver sus proyectos.

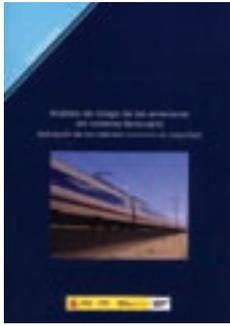
5. El nuevo método involucra una función que describe el desarrollo energético de la pluma de trazador y que por lo tanto es sensible al momento en que el trazador pierde un grado de libertad al llenar homogéneamente la sección transversal en la llamada condición de "Mezcla competente".
6. Se explica como con estas nuevas ecuaciones es posible calcular los tiempos de aparición de las primeras partículas de trazador así como la permanencia de las últimas partículas. Estas informaciones son de vital importancia para los estudios contemporáneos de calidad de agua. Se presentan también formulas derivadas del nuevo método que permiten calcular y predecir los tiempos en los que aparecerán las primeras partículas de trazador en el flujo y también el tiempo de permanencia de las últimas partículas. Igualmente una fórmula que permite calcular y predecir el valor de la concentración del trazador a través del cauce. Datos estos muy importantes para los estudios actuales de calidad de aguas.
7. Se presentan un experimentos de trazador salino realizados por H.B. Fischer en 1966 en el canal de 40 metros del laboratorio Caltech en California, Estados Unidos. Las curvas reales son comparadas con los modelos teóricos que resultan encontrándose una convergencia satisfactoria, aceptándose entonces que el método corresponde a realidades experimentales.

8. Esta técnica ampliada de estudio de trazadores vale en régimen no uniforme y para etapas tempranas de la evolución de la pluma en la que coexisten la difusión transversal y la dispersión longitudinal. Por estas razones su aplicación al estudio de las contaminaciones hídricas puede ser muy ventajosa frente a las metodologías actuales, muy restringidas por ser estacionarias.
9. Como el Coeficiente de dispersión en este artículo es función del tiempo, en trabajos posteriores se debe establecer las condiciones temporales de su aplicación de manera general.

10. BIBLIOGRAFÍA

- Constain, A., Carvajal, A., Carvajal, J., Lemos R. 2005. Nuevo método de cálculo de la Longitud de mezcla en cauces naturales usando trazadores conservativos. Revista Ingeniería del Agua, España, Vol.13, N°3.
- Constain A., Carvajal R., 2007. Accurate measurements of discharge using tracers, FLUCOME 9, University of Florida, Tallahassee. USA.
- Constain A. Carvajal. A., Lemos R. 2002. Applications of a non-uniform flow velocity in streams, River Flow 2002. Lovain-La-Neuve, Vol 1. 135-141.
- Constain a.; Lemos r.; Carvajal a., "Tecnología IMHE: Nuevos desarrollos en la hidráulica". Revista Ingeniería Civil, CEDEX, Vol 129, 2003.
- Constain A., Carvajal. A., Lemos R. 2006. Determinación teórica del Coeficiente de tiempos β en la ecuación de velocidad de flujo no uniforme en cauces naturales, XII Congreso de Ingeniería Mecánica de Chile, Universidad de Talca, N°42.
- Day, T.J.; "Longitudinal dispersion of fluid particles in mountain streams: Theory and field evidence", Journal of Hydrology (NZ), Vol 16, N°1, 1977.
- Elder J.W., 1959. The dispersion of marked fluid in turbulent shear flow. Journal of fluid mechanics, London, Vol 5. may. Pp 544-560.
- French, R.,1986, Open Channel hydraulics, Mc Graw-Hill, New York, 461-507 N.Y.
- Fischer H.B. "Longitudinal dispersion in laboratory and natural channels", PhD Thesis, CALTECH, 1966. Report No. KH-R-12, W. M. Keck Laboratory, California Institute of technology.
- Fischer. H.B 1967. The mechanics of dispersion in natural streams. Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of ASCE, nov. 187-215.
- Fischer, H.B., 1968, Dispersion predictions in natural streams, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the ASCE, USA. 927-943.
- Fischer, H.B., 1969, The effects of bends on dispersion in streams. Water resources research, Vol 5. N° 2. 496-505.
- Holley, R.E, 1969, Unified view of diffusion and Dispersion., Journal of Hydraulics Division Proceedings of ASCE. USA. 621-631.
- Prigogine I.; Kondepudi D.; Modern Thermodynamics. Wiley, New York, 1998.
- Taylor G.I.; "The dispersion of matter in turbulent flow through a pipe". Proceedings of the Royal society of London, 233, 1954.

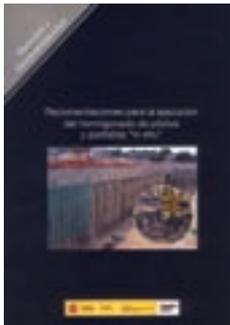
EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 516
Año de edición: 2012
P.V.P.: 25€

Este libro que se presenta, es el compendio del trabajo realizado por un grupo de expertos bajo la dirección del Laboratorio de Interoperabilidad Ferroviaria del CEDEX en el área de la seguridad del sistema ferroviario, para la identificación de aquellas amenazas significativas y su riesgo asociado que, en determinadas circunstancias, pueden interferir en el correcto funcionamiento del sistema ferroviario y que, por tanto, deben ser examinadas con especial atención en los procesos de evaluación de los diferentes subsistemas constitutivos del ferrocarril así como en las fases previas de obtención del Certificado de Seguridad para la puesta en servicio de los mismos. Estas amenazas determinan requisitos esenciales de seguridad a tener en cuenta en los Safety Cases de las diferentes instalaciones o

equipos para la concesión de la autorización de circulación de un nuevo vehículo o apertura de una línea o sección de línea. La metodología empleada en el proceso sigue las recomendaciones dadas por la ERA relativas a los Métodos Comunes de Seguridad (MCS) para el análisis del riesgo de amenazas y los criterios y los criterios expuestos en la EN 50126. La estructura que da cuerpo a todo el trabajo, es la Base de Datos General de Amenazas Significativas, Hazard Log, obtenida de la identificación y análisis de las amenazas realizado por un grupo de expertos en base a su experiencia, sobre cada uno de los subsistemas establecidos en las ETIs. De las amenazas consideradas se presentan unos Informes en los cuales, además de realizar una breve exposición de la amenaza y porqué se ha considerado, se incluyen las causas, que a juicio del experto, determinan la amenaza y las recomendaciones a seguir para reducir o mitigar su riesgo, es decir, los requisitos esenciales que a la hora de realizar el proyecto se deben tener en cuenta para mitigar o reducir el riesgo de la amenaza. En definitiva, este libro constituye una herramienta importante de ayuda en el seguimiento de la seguridad del sistema ferroviario y tiene también como objetivo la transmisión de experiencia sobre el funcionamiento real de los subsistemas ferroviarios y de sus puntos más críticos.



Nº de páginas: 285
Año de edición: 2011
P.V.P.: 25€

Las cimentaciones especiales hormigonadas in situ, objeto de la presente publicación, están constituidas por pilotes de desplazamiento y extracción, muros pantalla y pantallas de pilotes. La designación de estas cimentaciones proviene de sus condiciones especiales de puesta en obra de hormigón, generalmente con perforaciones profundas, bajo agua o fluido estabilizado, y con cuantías de armadura importantes; que obligan a exigir al hormigón una serie de características específicas. Si bien estos elementos están incluidos en la normativa española de aplicación a las estructuras de hormigón (EHE, Código Técnico y PG-3), al tratarse éstos de tratados generales, no se cubren muchos de los aspectos particulares en cuanto a las características que debería tener el hormigón y las precauciones que deberían tomarse durante la ejecución de este tipo de estructuras. Por ello y de forma complementaria, se ha desarrollado normativa europea de aplicación a los hormigones de cimentaciones especiales: la UNE-EN 1536 (Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Pilotes perforados) y la UNE-EN 1538 (Ejecución de trabajos especiales de geotecnia. Muros pantalla), ambas publicadas por AENOR en el año 2000. En este trabajo se recoge el Estado del Arte sobre el hormigonado de cimentaciones especiales, incluyendo su puesta en obra. En el texto redactado se detallan los requisitos incluidos en la normativa de aplicación (tanto la española y europea antes mencionadas como otras normativas internacionales específicas consultadas), justificando y explicando su importancia y necesidad. También se incluyen otros aspectos que pueden

contribuir a mejorar la calidad del hormigón de estas obras que, aunque no incluidos en la normativa, aparecen descritos en la bibliografía especializada o bien han sido extraídos de la experiencia práctica. El documento está dividido en diez capítulos, que cubren los materiales componentes del hormigón y su dosificación, puesta en obra, propiedades del hormigón fresco y endurecido, durabilidad, control de calidad y un último capítulo referente al hormigón autocompactante. El Estado del Arte redactado contiene un gran volumen de información, por lo que a efectos prácticos se ha puesto especial énfasis en el capítulo 10 resumen y conclusiones que de forma sintética recopila los aspectos fundamentales que deben tenerse en cuenta. Cualquier información incluida en este apartado puede ser ampliada y justificada en el capítulo correspondiente del Estado del Arte. Por último, el Anejo recoge los datos de mayor interés en relación con el hormigón utilizado en obras singulares de pantallas y pilotes "in situ" realizadas en España.



Nº de páginas: 265
Año de edición: 2009
P.V.P.: 20€

Este Manual pretende constituir una ayuda para todos aquellos que tienen que proyectar o construir firmes con capas tratadas con cemento, en especial para los técnicos que se enfrentan por primera vez a un firme de este tipo desde cualquier posición:

empresas consultoras, constructoras, laboratorios a administraciones. El texto detalla los conceptos básicos a los materiales tratados con cemento, las propiedades de los distintos tipos de mezclas, su dosificación y caracterización, y describe las prácticas más adecuadas para el proyecto, construcción y control de calidad de los firmes con capas tratadas con cemento. El Manual es el resultado de la colaboración entre el Instituto Español del Cemento y sus aplicaciones (IECA), y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), del Ministerio de Fomento.

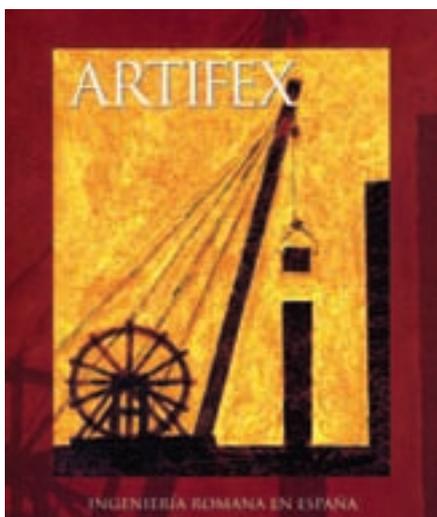
Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas

c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

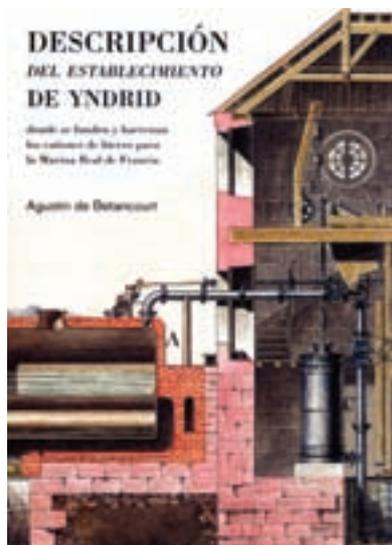
EDICIONES DEL CEDEX



Nº de páginas: 448
Año de edición: 2005
P.V.P.: 30€

La exposición Artífex. Ingeniería romana en España pretende dar a conocer el inmenso legado técnico del mundo romano; muestra los saberes en diversos campos de la tecnología y, de manera particular, sus aplicaciones a la ingeniería civil en Hispania, con el acento puesto en los procedimientos y técnicas emplea-

dos por el artífex o artífice. Los materiales y maquinaria utilizados en la construcción de obras públicas, los sistemas de abastecimiento de agua a las ciudades, y la ejecución de infraestructuras para el transporte terrestre y marítimo son algunos de los temas que componen el recorrido expositivo. Se trata de una versión adaptada para la itinerancia de la muestra homónima presentada en el Museo Arqueológico Nacional de Madrid en 2002, cuyo catálogo ha sido reeditado.



Nº de páginas: 86
Año de edición: 2008
P.V.P.: 45€

Este libro, obra de Agustín de Betancourt y Molina, describe con minuciosidad una fábrica de cañones ubicada en la pequeña isla de Yndrid (Francia), en el río Loira, junto a Nantes, cuyo original se guarda en la actualidad en la biblioteca del Palacio Real de Madrid bajo la custodia de Patrimonio Nacional. Esta edición, con la que se finaliza la conmemoración del 250 aniversario del nacimiento de su autor, respeta con la máxima exactitud

el contenido del manuscrito original, pero no así su formato (demasiado grande para ser consultado) ni su encuadernación (en piel con guardas en seda). El libro original incluye un texto preliminar manuscrito, seguido de 49 láminas de factura impecable. Fernando Sáenz Ridruejo, reconocido especialista en la trayectoria vital y profesional de Betancourt, ha realizado para esta ocasión un análisis completo de su figura, su tiempo y su obra a modo de complemento.



Nº de páginas: 103
Año de edición: 2012
P.V.P.: 20€

El presente manual es resultado del proyecto de investigación (PT-2007-035-18IAPM) "Determinación del nivel de riesgo aceptado en el funcionamiento del ferrocarril en España para los diferentes subsistemas existentes" (DETRA) subvencionado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) dentro del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2004-2007, con el objetivo de proporcionar a la autoridad ferroviaria española información del nivel de riesgo en el ferrocarril español en base al estudio y análisis del histórico de los accidentes e incidentes ocurridos en los últimos años, siendo un referente en la gestión de riesgos desde el enfoque sistémico, tanto a nivel nacional como internacional. El manual se ha estructurado en cuatro grandes bloques. El primer bloque (capítulo 1) ofrece al lector una visión del marco normativo nacional y europeo en la gestión de la seguridad ferroviaria y describe el alcance del proyecto DETRA dentro de este marco. El segundo bloque (capítulo 2) expone la metodología más adecuada para la obtención del nivel de riesgo de un sistema ferroviario, ilustrándola con la experiencia obtenida de la aplicación de dicha metodología a través del proyecto DETRA en el ferrocarril español. En el tercer bloque (capítulo 3) se exponen los resultados de la aplicación de la metodología DETRA al sistema ferroviario español para el período temporal 2000-2008, obteniendo fundamentalmente el nivel de riesgo del sistema ferroviario español mediante los Indicadores de Valor de Referencia (IVR). Finalmente, el último bloque (capítulos 4 y 5) recoge las conclusiones y recomendaciones obtenidas en relación a: i) las tasas de nivel de riesgo; ii) el sistema ferroviario de fallos; iii) los principales colectivos de riesgo; iv) la asignación de los niveles de riesgo a los actores ferroviarios y las personas ajenas al ferrocarril y, v) indicadores de la Directiva de Seguridad Ferroviaria 2004/49/CE.

Pedidos

Para realizar un pedido de publicaciones puede hacerlo por teléfono, fax o correo a:
CEDEX Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
c/ Alfonso XII, 3 - 28014 Madrid

Teléfono: (+34) 91 335 72 95 • Fax: (+34) 91 335 72 49 • E-mail: publicaciones@cedex.es

Ingeniería Civil

Normas de Redacción y Publicación de Artículos

Información general

La revista Ingeniería Civil, editada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas es una publicación científica destinada a un público especializado en los campos de ingeniería civil y medioambiental. Es una revista arbitrada que utiliza el sistema de revisión por pares y en la que son objeto de evaluación externa todos los trabajos recibidos. Acepta para su publicación trabajos de investigación especializados cuya cobertura temática cubre los campos de ingeniería civil y medioambiental, hidrología, transporte, geotecnia, materiales de construcción, puertos y costas e historia de las obras públicas, con el objetivo de dar a conocer la tecnología más avanzada y su contribución al desarrollo de las obras públicas.

Las personas interesadas en publicar sus artículos en la revista Ingeniería Civil, deben dirigir sus trabajos al Secretario de la revista de Ingeniería Civil. C/ Alfonso XII, 3 y 5, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Edificio CETA), 28014 Madrid, España, o bien, a las siguientes direcciones de correo electrónico:

ana.garcia@cedex.es, alejandro.d.martos@cedex.es, olga.sanchez@cedex.es, o ingcivil@cedex.es.

En cualquier caso, será indispensable entregar el artículo en soporte digital.

Los originales deberán seguir, siempre que sea posible la siguiente estructura: resumen, palabras clave, texto (introducción, material y métodos, resultados y discusión), agradecimientos y bibliografía.

Presentación de los trabajos

Con carácter general, la extensión máxima del texto será de 40 páginas tamaño DIN-A4, (en formato Word), escritas a doble espacio, cuerpo de letra 12. En casos excepcionales podrán publicarse artículos de mayor extensión, que quedarán igualmente al criterio y aprobación del Comité de Redacción.

El artículo se acompañará de una **carta de presentación** en la que se solicite la consideración del artículo y en la que, además, el autor explicará en 4-5 líneas, cual es la aportación original del trabajo que presenta y sus novedades, la declaración de no envío simultáneo a otras revistas y la confirmación de las autorías firmantes. Asimismo, en esta carta figurará la cesión de todos los derechos al editor.

Los Artículos se presentarán de acuerdo al siguiente orden y estructura:

Título del artículo: Conciso pero informativo, en castellano e inglés.

Nombre y dos apellidos de cada uno de los autores. En el caso del primer autor, se añadirá la dirección del correo electrónico. Se incluirán las referencias profesionales y académicas de los autores.

Información sobre becas, ayudas o soporte financiero con el que se ha contado (Proyectos de Investigación) para la subvención del trabajo y otras especificaciones, cuando sea el caso. Debe aportarse también el título traducido al inglés.

Resumen del trabajo: Será de una extensión entre 200-250 palabras y tendrá dos versiones, una en castellano y otra en inglés.

Palabras clave: Tendrá dos versiones, una en castellano y otra en inglés. Se especificarán entre 5-10 palabras clave que identifiquen el contenido del trabajo, y para facilitar su inclusión los repertorios y bases de datos nacionales e internacionales. Se recomienda utilizar términos controlados de referencia extraídos del *Thesaurus of Engineering and Scientific Terms*, publicado por *The American Association of Engineering Societies, Washington, D.C.* y disponible en la web:

<http://www.amazon.com/Thesaurus-Engineering-Scientific-EngineersCouncil/dp/0685092895>

Texto del Artículo: Los trabajos deben ir, si la estructura y contenidos así lo permiten, divididos en los siguientes apartados: Introducción, Material y Métodos, Resultados y Discusión.

Introducción: Debe incluir los fundamentos y el propósito del estudio, utilizar las citas bibliográficas estrictamente necesarias. No incluirá datos o conclusiones del trabajo que se presenta ni realizará una revisión bibliográfica detallada.

Material y métodos: Las fuentes y métodos previamente publicados deben describirse sólo brevemente y aportar las correspondientes citas, excepto que se hayan realizado modificaciones en los mismos. Se describirá el cálculo utilizado y la forma de muestreo, en su caso. Se hará referencia al tipo de análisis crítico, estadístico, etc., empleado (indíquese el que proceda según área de conocimiento). Si se trata de una metodología original, es necesario exponer las razones que han conducido a su empleo y escribir sus posibles limitaciones. Cuando se haga referencia a sustancias o productos químicos o materiales debe indicarse el nombre genérico.

Resultados: Aparecerán en una secuencia lógica en el texto, tablas o figuras. No se repetirán en todas ellas los mismos datos ya recogidos en el texto. Se procurará resaltar las observaciones importantes. Se describirán, sin interpretar ni hacer juicios de valor, las observaciones efectuadas con el material y métodos empleados.

Discusión: Resumirá los hallazgos, relacionando las propias observaciones con otros estudios de interés, y señalará las aportaciones y limitaciones de unos y otros. No se deben repetir con detalle los datos u otro material ya comentado en otros apartados. Mencionar las inferencias de los hallazgos y sus limitaciones, incluyendo las deducciones para una investigación futura.

Es adecuado enlazar las conclusiones con los objetivos del estudio, evitar las afirmaciones gratuitas y las conclusiones no apoyadas completamente por los datos del trabajo.

Agradecimientos: Únicamente se agradecerá su colaboración a personas que hayan hecho contribuciones sustanciales al estudio.

Citas en el texto: Autor y año entre paréntesis. Cuando el autor forma parte de la argumentación sólo el año entre paréntesis. Cuando se cita varias veces a un mismo autor pero a distinta obra del mismo año, se le añade a, b, c.

...procedimiento de cimentación suficientemente acreditado (Redwood and Jain 1992)]. Asimismo, Van der Sanden and Hoekman (2005) propusieron.....En otras situaciones (Redwood and Jain 1992a) la cimentación.....

Para la elaboración de las referencias se recomienda el seguimiento de la norma ISO 690 o los criterios de los ejemplos descritos a continuación:

Artículo de una revista:

APELLIDO(S), Nombre. Título del artículo. Responsabilidad secundaria. Título de la publicación seriada. Edición. Localización en el documento fuente: año, número, páginas.

Ejemplo:

REDWOOD, R.G., JAIN, A.K. *Code provisions for seismic design for concentrically braced steel frames* Canadian Journal of Civil Engineering, 1992. Vol 19, Nº 6. 1025–1031.

Libro:

APELLIDO(S), Nombre. *Título del libro*. Mención de responsabilidad secundaria (traductor; prologuista; ilustrador; coordinador; etc.)*. Nº de edición. Lugar de edición: editorial, año de edición. Nº de páginas*. Serie*. Notas*. ISBN

Ejemplo:

BOBBIO, Norberto. *Autobiografía*. Papuzzi, Alberto (ed. lit.); Peces-Barba, Gregorio (prol.); Benitez, Esther (trad.). Madrid: Taurus, 1988. 299 p. ISBN: 84-306-0267-4

Parte de un libro:

APELLIDO(S), Nombre. Título de la parte. En: Título de la obra. Edición. Lugar de edición: editorial, año de edición. Situación de la parte en la obra.

Ejemplo:

HEALEY, M.C. The ecology of juvenile salmon in Georgia Strait, British Columbia. En: *Salmonid ecosystems of the North Pacific*. Editado por W.J. McNeil, D.C. Himsworth. Corvallis, Oregon. State University Press. 1980. pp. 203–229.

Ponencias de congresos: Referencia similar a una parte de un libro

APELLIDO(S), Nombre. "Título de la parte". En: APELLIDO(S), Nombre. Título de la obra completa. Responsabilidades secundarias*. N° de edición. Lugar: editorial, año de publicación. Serie*. ISBN

Informe:

APELLIDO(S), Nombre. *Título del informe*. Lugar de publicación: editorial, año. Serie, n° de la serie. (Disponibilidad)

SANDERS, W.W., Jr., ELLEBY, H.A. Distribution of wheel loads in highway bridges. National Cooperative Highway Research Program Report 83, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. 1970.

Documentos Electrónicos:

Responsable principal. *Título* [tipo de soporte]. Responsables secundarios*. Edición. Lugar de publicación: editor, fecha de publicación, fecha de actualización o revisión, [fecha de consulta]**. Descripción física*. (Colección)*. Notas*. Disponibilidad y acceso**. Número normalizado*

Ejemplo:

U.S. ISBN Agency. *The Digital World and the Ongoing Development of ISBN* [en línea]. New Providence, N.J.: RR Bowker, s.d. [ref. de 16 de agosto 2002]. Disponible en Web: <http://www.isbn.org/standards/home/isbn/digitalworld.asp>.

El listado bibliográfico debe ser corregido por el autor, comparándolo con la copia en su poder. Se evitará utilizar como citas bibliográficas frases imprecisas. No pueden emplearse como tales las que precisen de aclaraciones como "observaciones no publicadas", ni "comunicación personal", aunque sí podrán citarse dentro del texto entre paréntesis. Los trabajos aceptados, pero aún no publicados, se incluirán en las citas bibliográficas especificando el nombre de la revista, seguido por la expresión "en prensa".

Figuras (Tablas): Serán consideradas figuras todo tipo de imágenes fotografías, gráficas o dibujos. Se ordenarán según orden de aparición en el texto, y serán identificadas por el término abreviado fig. n° o, en su caso, tabla n°. Los títulos o pies que las acompañen deben explicar perfectamente el contenido de las mismas. Se exige que tengan una resolución mínima de 300 ppp.

Proceso editorial

Los trabajos se remitirán acompañados de una carta de presentación, en la que se solicitará la evaluación para su publicación en alguna de las secciones de la Revista, con indicación expresa de que se trata de un trabajo que no ha sido difundido ni publicado anteriormente, que se envía únicamente a la revista Ingeniería Civil para su evaluación y publicación, si procede, así como las aportaciones en cuanto a originalidad y novedad que, a juicio de los autores, plantea el trabajo.

La redacción de la Revista acusará recibo a los autores de los trabajos que le lleguen y posteriormente informará de su aceptación o rechazo.

La redacción pasará a considerar el trabajo para su publicación por el Comité Editorial, para lo que comprobará si se adecua la cobertura de la revista y cumple las normas de publicación. En tal caso se procederá a su revisión externa.

Los artículos serán revisados de forma anónima por dos expertos en el objeto de estudio y/o metodología empleada. La redacción de la Revista, a la vista de los informes externos, se reserva el derecho de aceptar/rechazar los artículos para su publicación, así como el de introducir modificaciones de estilo y/o acortar los textos que sobrepasen la extensión permitida, con el compromiso, en tal supuesto, de respetar el contenido del original.

Los autores/as de artículos aceptados recibirán las pruebas de imprenta para su corrección por correo electrónico. Deberán devolverlas corregidas a la redacción de la Revista dentro de la semana siguiente a su recepción.

DIRECCIÓNDirector: **Mariano Navas Gutiérrez**Calle de Alfonso XII, 3
28014 MADRID

- Telf.: 913 357 500
- Télex: 45022 CEDEX E
- Fax: 915 280 354

SECRETARÍASecretario: **Manuel Echeverría Martínez****RELACIONES EXTERNAS Y ACTIVIDADES COMERCIALES**Jefe: **Miguel González Portal**

Telf.: 913 357 490 • Fax: 913 357 538

CENTRO DE ESTUDIOS DE PUERTOS Y COSTASDirector: **José María Grassa Garrido**Calle Antonio López, 81 • 28026 MADRID
Telf.: 913 357 700 • Fax: 913 357 622**CENTRO DE ESTUDIOS HIDROGRÁFICOS**Director: **Federico Estrada Lorenzo**Paseo Bajo de la Virgen del Puerto, 3 • 28005 MADRID
Telf.: 913 357 900 • Fax: 913 357 922**CENTRO DE ESTUDIOS DEL TRANSPORTE**Director: **Antonio Sánchez Trujillano**Autovía de Colmenar Viejo, km 18,2
28049 El Goloso (MADRID)
Telf.: 913 357 800 • Fax: 913 357 822**CENTRO DE ESTUDIOS DE TÉCNICAS APLICADAS**Director: **Alberto Compte Anguela**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID
Telf.: 913 357 200 • Fax: 913 357 249**LABORATORIO CENTRAL DE ESTRUCTURAS
Y MATERIALES**Director: **José Manuel Gállego Estévez**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID
Telf.: 913 357 400 • Fax: 913 357 422**LABORATORIO DE GEOTECNIA**Director: **Fernando Pardo de Santayana Carrillo**Calle de Alfonso XII, 3 • 28014 MADRID
Telf.: 913 357 300 • Fax: 913 357 322**LABORATORIO DE INTEROPERABILIDAD
FERROVIARIA**Director: **Jaime Tamarit Rodríguez**Calle Julián Camarillo, 30 • 28037 MADRID
Telf.: 913 357 150 • Fax: 913 357 197**CENTRO DE ESTUDIOS HISTÓRICOS DE
OBRAS PÚBLICAS Y URBANISMO (CEHOPU)**Calle de Zurbano, 7 • 28010 MADRID
Telf.: 913 489 800 • Fax: 913 489 816



Ingeniería Civil

Boletín de suscripción

Email: ingcivil@cedex.es

Teléfono: 91 335 72 69

España un año: **49 €**

Extranjero un año: **81,12 €**

Empresa N.I.F. Particular N.I.F.
 Nombre Cargo
 Dirección Código Postal
 Población Provincia
 Teléfono Fax E-mail

Formas de Pago

(Elijase solamente una opción)

Domiciliación bancaria (Solamente para cuentas bancarias en España)

Muy Sres. míos:

Ruego que, con cargo a mi cuenta y hasta nuevo aviso, atiendan el pago de los recibos correspondientes a mi suscripción que les presentará al cobro la REVISTA INGENIERIA, editada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX.

Les saluda atentamente

Entidad bancaria
 Domicilio entidad
 C.P. Localidad Provincia

Entidad	Oficina	D.C.	Núm. de cuenta

Transferencia a favor del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX

Cuenta del CEDEX (desde España):

0182 - 2370 - 45 - 0200200574

Cuenta del CEDEX (desde el extranjero):

IBAN: **ES6501822370450200200574**

SWIFT: **BBVAESMM**

Cheque nominativo a favor del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas CEDEX

Fecha

Firma

El Titular, Fdo.

Enviar a:

Revista **Ingeniería Civil** (PUBLICACIONES)

Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas del  • c/ Alfonso XII, 3 • 28014 Madrid

desde nuestra página web

www.cedex.es

ferrovial
agroman

FERROVIAL AGROMAN LLEVA EL AVE A ALICANTE

Llevamos años abriendo nuevas vías de futuro, como el nuevo Acceso ferroviario de Alta Velocidad de Levante, en el cual Ferrovial Agromán ha participado en el tramo: Albacete-Variante de Alpera.

Porque creemos en conectar lugares y personas, porque avanzamos hacia el progreso.



Nuevo acceso ferroviario de Alta Velocidad de Levante. Tramo: Albacete-Variante de Alpera.