

APLICACION DEL MODELO MATEMATICO HEC-2 EN EL ESTUDIO DE POSIBLES MODIFICACIONES DEL PROYECTO DE ENCAUZAMIENTO DEL BARRANCO DE CARRAIXET (VALENCIA) UTILIZANDO ENSAYOS PREEXISTENTES EN MODELO FISICO

FRANCISCO JAVIER FERRER POLO (*)

RESUMEN. La posibilidad de aumentar el gálibo, importante condicionante en la configuración adoptada finalmente en el encauzamiento, en los puentes de ferrocarril existentes en el barranco de Carraixet (Valencia), ha aconsejado estudiar la línea de agua para soluciones distintas a la proyectada. En este trabajo se describe la aplicación del modelo matemático HEC-2 y la utilización en la calibración de sus parámetros de los resultados preexistentes de ensayos realizados por el CEH sobre modelo físico.

ABSTRACT. *The clearance of railway bridges, in the Carraixet creek (Valencia) was one of the conditioning causes in the final solution in the channel project. The possibility of increase this clearance has advised the study of water profile for alternative solutions. In this paper is described the application of mathematical model HEC-2. The results from past studies about phisical model by CEH has been used for the calibration of its parameters.*

1. INTRODUCCION

La línea ferroviaria Valencia-Tarragona realiza el cruce del barranco de Carraixet (ver plano n.º 1) en el punto kilométrico 9.152 a unos 300 m de su desembocadura en el mar, mediante dos puentes de muy distintas características.

Mientras el puente de la vía impar presenta una luz superior a los 60 m (ver plano n.º 2) con cuatro pilas intermedias, en la par se encuentra un puente metálico de un sólo vano con una luz libre de 20 m que está previsto sustituir por uno semejante al de la otra vía.

Con posterioridad a la construcción debidamente autorizada del primero de los puentes citados, se estudió en modelo reducido el funcionamiento del encauzamiento del Carraixet previsto en el «Proyecto 04/74 de la Red Arterial de Valencia, Tramo de Quart de Poblet Autopista A-7. Encauzamiento, defensa y laminación de avenidas de los Barrancos de Carraixet y Palmaret».

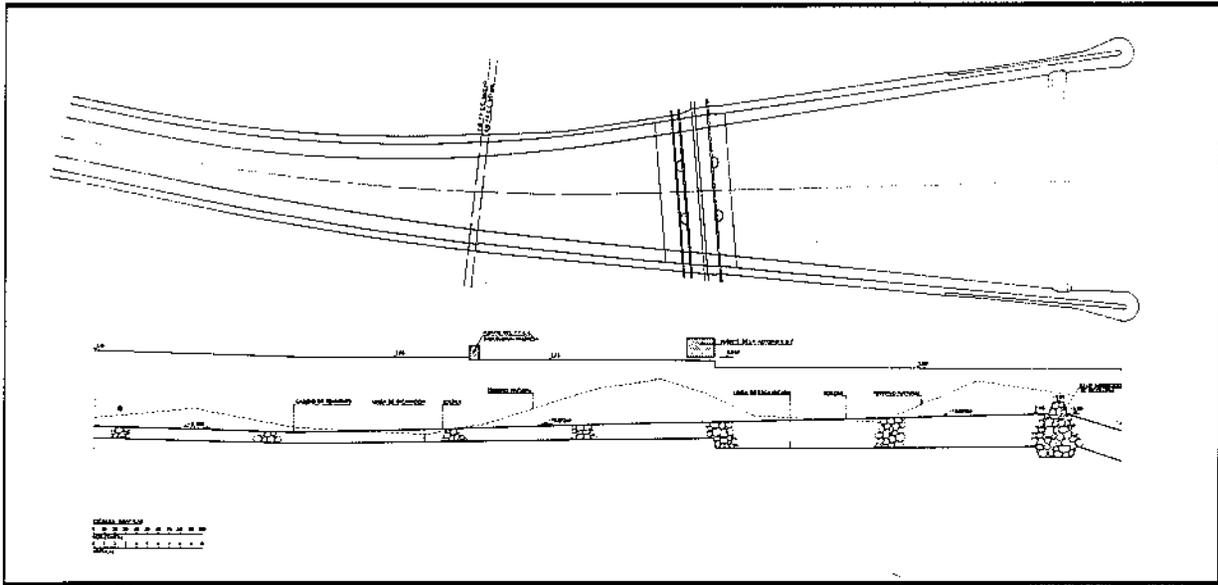
Estos ensayos fueron realizados en el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, recogándose sus resultados en el «Informe sobre el Estudio en modelo reducido tridimensional del encauzamiento de los Barrancos de Carraixet y Palmaret. Madrid, 1983».

En la experimentación, donde se supuso ya sustituido el antiguo puente metálico por otro idéntico al existente en la vía impar, se comprobó que las estructuras ferroviarias, cuya parte inferior se encuentra a la cota 2,755 m, imponen unas severas limitaciones a la máxima lámina de agua, que obligan a adoptar en el tramo final del encauzamiento (ver plano n.º 3):

- A. Una planta con un ancho singularmente alto (superior en la desembocadura a la Solución Sur del río Turia) con la consiguiente ocupación de terrenos.
- B. Perfil longitudinal profundizado hasta la cota 3,70 m en el entorno de la estructura del ferrocarril y que asciende luego en contrapendiente.

La depresión del perfil, la gran anchura de la sección y la presencia del mar, que asegura unos calados mínimos incluso con caudales pequeños, son factores que favorecen por una parte la creación de extensas e indesea-

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX (MOPU).



PLANO 3. Encauzamiento Carraixet. Desembocadura. Solución final.

bles zonas de aguas muertas y por otra el depósito de sedimentos que obligarían a los servicios de conservación responsables de los cauces a frecuentes labores de limpieza.

La intención de Renfe de sustituir el antiguo puente metálico, para permitir velocidades de circulación de 160 km/h, ofrece una oportunidad especialmente favorable para plantearse la conveniencia de modificar también el otro puente y con él el proyecto de encauzamiento del barranco, a fin de evitar los inconvenientes antes apuntados.

La reducción de expropiaciones y de los costes de construcción y explotación del encauzamiento, así como las mejoras en el funcionamiento del cauce desde el punto de vista hidráulico y medioambiental justifican los gastos de sustitución de los dos puentes y de la modificación de la rasante de la vía.

La necesidad de obtener resultados orientativos sobre el gálibo necesario en los puentes de ferrocarril en un corto plazo de tiempo llevó a utilizar un modelo matemático en vez de plantear ensayos en modelo reducido.

Los datos existentes de los ensayos realizados en modelo físico han permitido calibrar los parámetros del modelo matemático y utilizarlo para simular la influencia de distintos anchos y perfiles longitudinales en la cota de la lámina de agua, aguas arriba del ferrocarril. De este modo, se han obtenido unos valores orientativos de cual sería la elevación de rasante que permitiría ejecutar las alternativas estudiadas. Estas alternativas van dirigidas fundamentalmente a reducir el ancho y evitar contrapendientes en el perfil longitudinal con lo que se evitarían los previsibles aterramientos del encauzamiento actualmente proyectado.

Los resultados obtenidos, si bien son suficientes para el objetivo propuesto, no deben sustituir a posteriores ensayos en modelo reducido que estudien en detalle el comportamiento de las modificaciones planteadas en el encauzamiento.

2. MODELO MATEMATICO UTILIZADO: HEC-2

2.1. CARACTERISTICAS GENERALES

El modelo matemático HEC-2 fue desarrollado por el Hidrologic Engineering Center (HEC), organismo dependiente del US Army Corps of Engineers en 1976 en su primera versión siendo el más ampliamente usado para calcular perfiles de la lámina de agua en cauces.

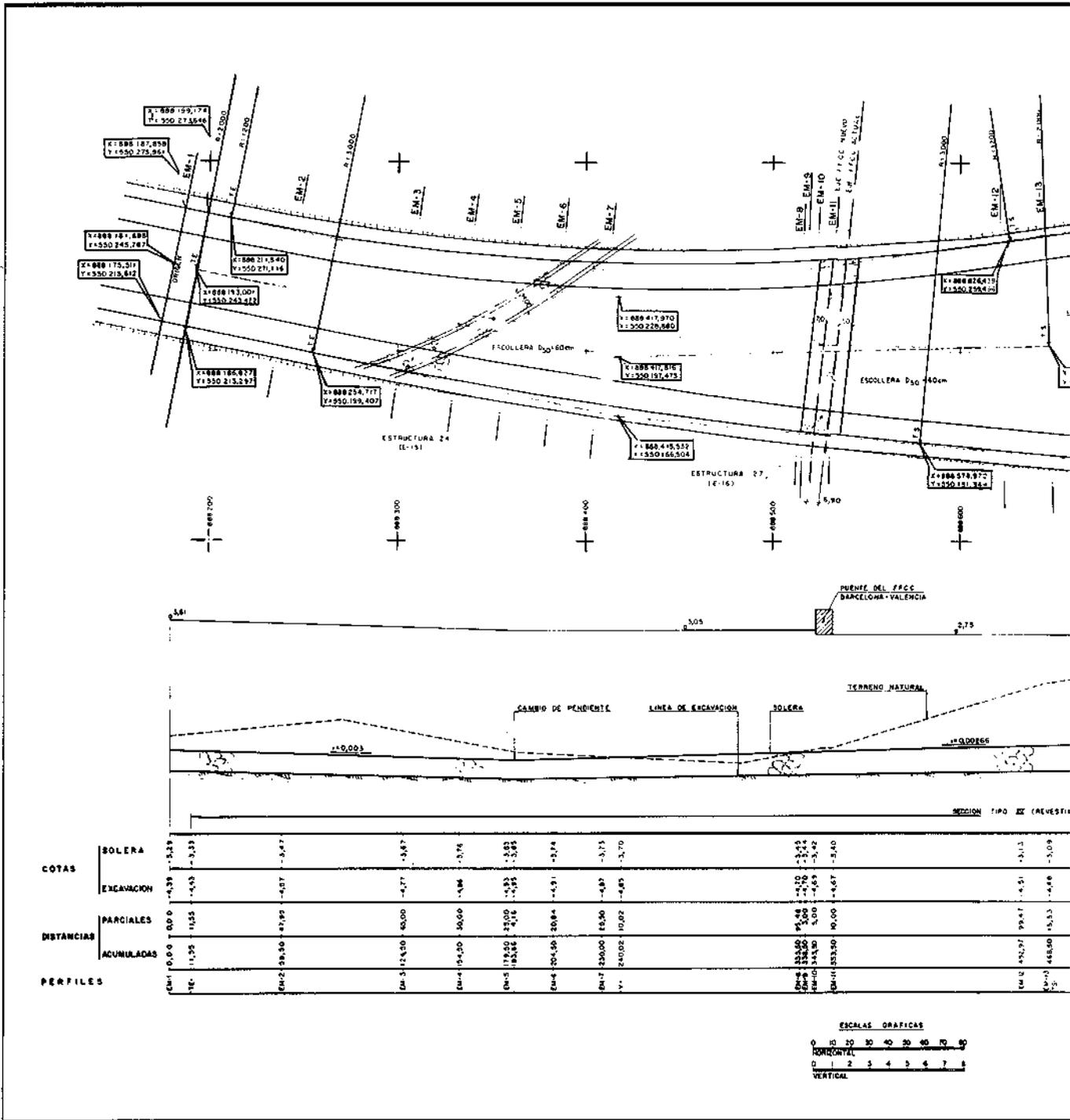
Las principales hipótesis asumidas en el modelo HEC-2 son las siguientes:

- Flujo estacionario, por tanto no hay variación del calado o la velocidad con el tiempo.
- Flujo gradualmente variado. Esto conduce a una distribución hidrostática de presiones.
- Flujo unidimensional: la única componente de la velocidad es en la dirección del flujo.
- Las pendientes deben ser pequeñas, menores de 1/10: con ello $\cos \theta \approx 1$ y el calado vertical es representativo de la altura de presión.
- Los contornos son rígidos, no admitiéndose erosión o sedimentación en el cauce.

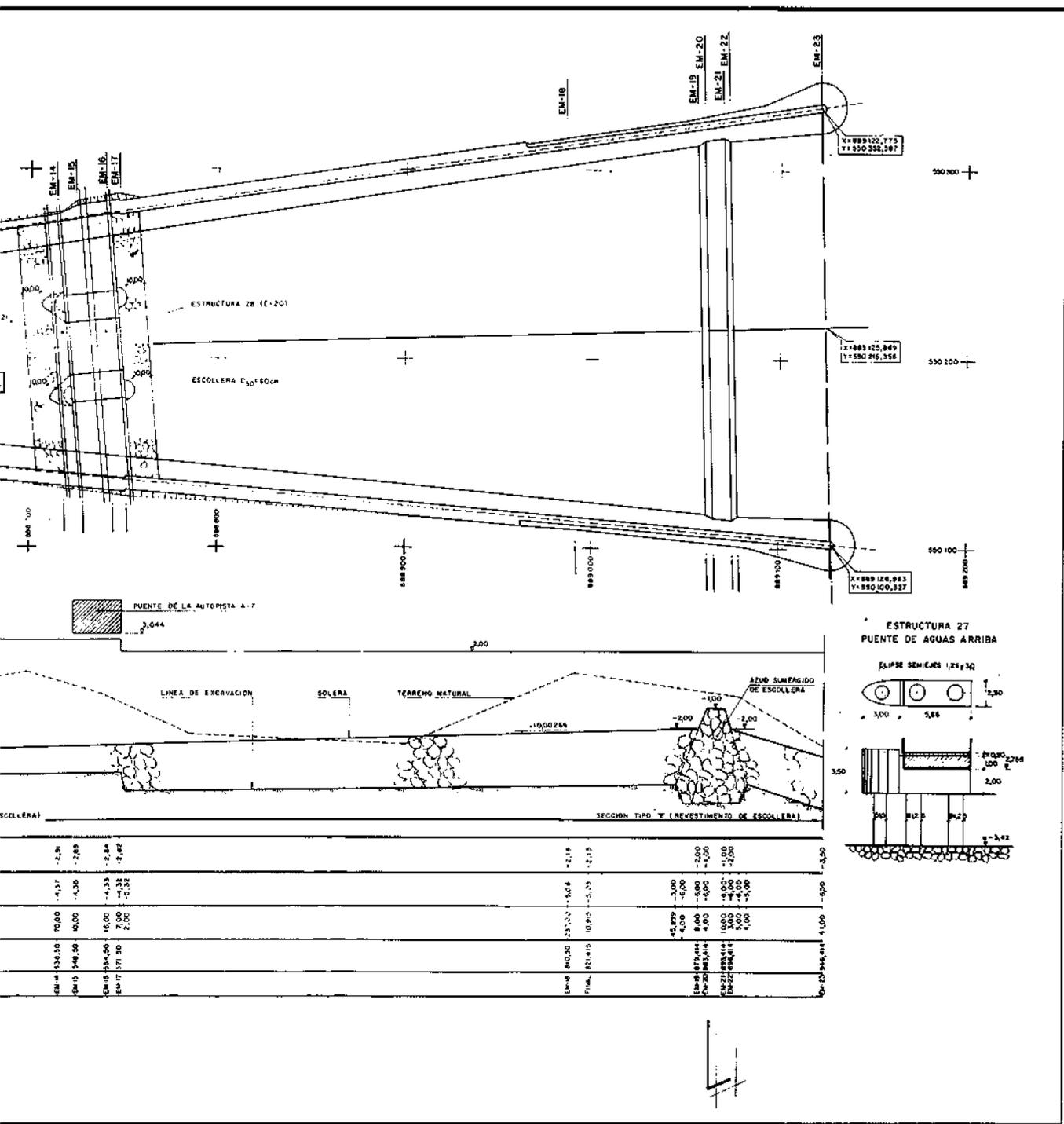
Con estas hipótesis, la ecuación básica de conservación de energía entre dos secciones: S1 y S2 de un flujo unidimensional es:

$$Z_1 + Y_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + Y_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_e \quad (1)$$

OBRAS HIDRAULICAS



PLANO 4. Encauzamiento Carraixet. Desembocadura. Solución final. (Reproducido del «Informe sobre el estudio modelo reducido tridimensional del encauzamiento de las



Carraixet y Palmaret» C.E.H. Diciembre 1982.]

siendo para la sección transversal 1 ó 2:

Z : elevación del fondo de la sección transversal respecto a una cota de referencia.

Y : calado del agua en la sección transversal.

α : coeficiente de energía, que tiene en cuenta la distribución no uniforme de velocidades en esa sección.

V : velocidad media del flujo en la sección.

g : aceleración de la gravedad.

h_e : pérdida de energía entre las secciones 1 y 2.

Esta pérdida h_e , viene determinada por la expresión:

$$h_e = L \cdot \overline{Sf} + C \left| \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} - \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right| \quad (2)$$

siendo:

L = longitud de tramo.

\overline{Sf} = pendiente de fricción del tramo.

C = coeficiente de pérdidas por expansión o contracción.

La hipótesis fundamental realizada por el HEC-2 es que la pérdida de altura por fricción en una sección es la misma que tendría un flujo uniforme que tuviese la velocidad y radio hidráulico correspondientes a esa sección. Esta hipótesis permite aplicar la fórmula de Manning de flujo uniforme para evaluar la pendiente de fricción en una sección transversal del cauce, con lo que resulta:

$$Q = K Sf^{1/2} \quad (3)$$

siendo:

Q = caudal.

K = capacidad que responde a la expresión.

$$K = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} \quad (4)$$

siendo:

n = coeficiente rugosidad de Manning.

A = sección transversal.

R_h = radio hidráulico.

2.2. TRATAMIENTO DE LOS PUENTES

Una de las particularidades del modelo es el tratamiento que realiza de los puentes, permitiendo tratar el flujo en lámina libre por la sección, su posible entrada en carga y el vertido por encima de la estructura.

En el caso objeto del estudio sólo va a producirse el primero de los flujos para lo cual se realiza una aproximación trapecial de la sección del puente, totalmente justificada dada la geometría del encauzamiento.

El modelo realiza un balance de momentos entre la sección del puente y la inmediata contigua obteniendo el

régimen del flujo a través de la estructura distinguiendo para régimen lento entre:

Flujo Clase A: El régimen a través del puente sigue siendo lento.

Se utiliza la ecuación semiempírica de Yarnell:

$$H_3 = 2K (K + 10w - 0,6) (\alpha + 15 \alpha^4) V_3^2 / 2g$$

siendo:

H_3 = diferencia en la lámina de agua entre las secciones de aguas arriba y aguas abajo del puente.

K = coeficiente de forma de las pilas del puente.

w = cociente altura de velocidad/calado aguas abajo del puente.

α = cociente área obstruida/área total sin obstruir.

V_3 = velocidad aguas abajo del puente.

Flujo Clase B: La restricción del puente provoca el paso a régimen crítico.

En este caso, se calcula el calado crítico en la sección del puente obteniendo posteriormente por balance de momentos los calados en la secciones aguas arriba y aguas abajo de la estructura.

3. DESARROLLO Y CALIBRACION DEL MODELO

3.1. GEOMETRIA DEL ENCAUZAMIENTO

En el informe del CEH referido anteriormente sobre los ensayos realizados en modelo reducido, se define su geometría en el caso del proyecto inicial y de la solución final recomendada (plano n.º 4), siendo ambas soluciones coincidentes en la zona que nos ocupa.

Esta solución final con mínimas diferencias es la considerada en el «Proyecto de encauzamiento del barranco de Carraixet. Tramo entre el sifón de la acequia de Rascaña y el mar», CHJ, abril 1988.

Se ha modelado la zona comprendida entre los perfiles EM-7 y EM-23, donde se encuentran situadas las estructuras del ferrocarril objeto del estudio. En este tramo, el encauzamiento presenta secciones trapeciales con talud 2/1. Las secciones transversales contempladas en el modelo matemático coinciden con las señaladas en el ya referido plano n.º 4.

3.2. GEOMETRIA DE LAS ESTRUCTURAS

Las estructuras consideradas han sido las dos siguientes:

— Puente del ferrocarril (E-27 en el mencionado plano), consistente en un doble puente con cuatro pilas intermedias de ancho total 4,0 m con vanos del orden de 20 m.

— Puente de la Autopista A-7, con dos pilas centrales de gran espesor (10 m), antiguos estribos y dos laterales con un ancho total de 4 m. En posteriores comprobaciones se sustituyeron las dos pilas centrales por otras esbeltas con un ancho total de 3,0 m.

3.3. CONDICION DE CONTORNO Y CAUDAL

La condición de contorno impuesta por el mar se ha considerado como un nivel constante a la cota 0,75 m, modelándose el azud sumergido como una elevación puntual de la solera. El caudal considerado en todas las hipótesis ha sido de 1.500 m³/seg que corresponde a la máxima capacidad prevista sin resguardo.

3.4. COEFICIENTE DE PERDIDAS

Rugosidad del cauce

Los ensayos realizados en modelo reducido, aconsejaron aumentar el tamaño de la escollera prevista en el proyecto para asegurar la estabilidad del encauzamiento con el máximo caudal previsto. Por ello la rugosidad en el cauce en los tramos IV y V (ver plano n.º 4), fue distinta en los ensayos de la solución proyecto y en los de la solución final.

Solución proyecto:

En el tramo IV se proyectó escollera con $D_{75} = 0,30$ m, tanto en fondo como en cajeros. Admitiendo las siguientes expresiones empíricas que relacionan diámetros y coeficientes de rugosidad de Manning:

$$n = \frac{D_{90}^{1/6}}{26} = \frac{D_{50}^{1/6}}{21}$$

e interpolando linealmente para D_{75} , resulta $n = 0,034$.

En el tramo V se proyectó escollera de 3,21 T en cajeros y 0,16 T en fondo que admitiendo D_{50} igual al diámetro de la esfera equivalente conduce a valores de n de 0,045 y 0,038 respectivamente, para un peso específico de 2,65 T/m³.

Solución final:

En el tramo IV se decidió colocar escollera $D_{50} = 0,35$ m mientras en el tramo V tanto en cajeros como en fondo se dispuso escollera $D_{50} = 0,60$ m. La aplicación de las anteriores fórmulas conducen a unos valores de n de 0,040 y 0,045 respectivamente.

Los anteriores valores de los coeficientes de Manning serán introducidos en el modelo matemático, comprobando si deben ser corregidos para conseguir una buena reproducción de los resultados obtenidos en el modelo físico.

Coefficientes de pérdidas localizados

Coefficientes de pérdidas por expansión y contracción.

Las pérdidas entre dos secciones consecutivas por el aumento o disminución de la altura de velocidad son proporcionales a su diferencia en valor absoluto tomando los coeficientes de proporcionalidad: a , unos valores que según la bibliografía se encuentran en torno a:

Contracción: $a = 0,1$

Expansión: $a = 0,3$

Estos valores serán los utilizados inicialmente en modelo matemático.

	<u>K</u>
	0,90
	0,95
	1,05
	1,05
	1,25

FIGURA 1.

Coefficiente de pérdidas en puentes.

La ecuación utilizada es la de Yarnell, ya indicada anteriormente, de carácter semiempírico y que calcula la diferencia de nivel a ambos lados del puente a partir de las características geométricas y del denominado coeficiente de pila, K , que adopta distintos valores en función de la tipología de las pilas.

Los valores medidos para distintas formas de pila se indican en la figura 1.

Estos coeficientes han sido calibrados en las distintas ejecuciones del modelo para reproducir la lámina de agua observada en los ensayos en modelo reducido.

3.5. CALIBRACION DEL MODELO

Los ensayos realizados en modelo reducido, y de los cuales se disponen datos de la línea de agua, se resumen en la tabla I, en la que se define la nomenclatura que será utilizada.

Se han simulado las ocho hipótesis indicadas, calibrando los coeficientes de pérdidas para obtener un ade-

	SIN ATERRAMIENTO	ATERRAMIENTO A LA COTA -2,0 m
Solución proyecto sin estructuras.	E-0	—
Solución proyecto con estructuras.	E-1	E-2
Solución proyecto con estructuras y sustitución de los pilas del puente de la A-7 por otras más esbeltas.	E-3	E-4
Solución proyecto con estructuras, pilas esbeltas en el puente de la A-7 y un estrechamiento lineal del cajero izquierdo de 50 m en el final.	E-5	E-6
Solución final con estructuras	E-7	—

TABLA I.

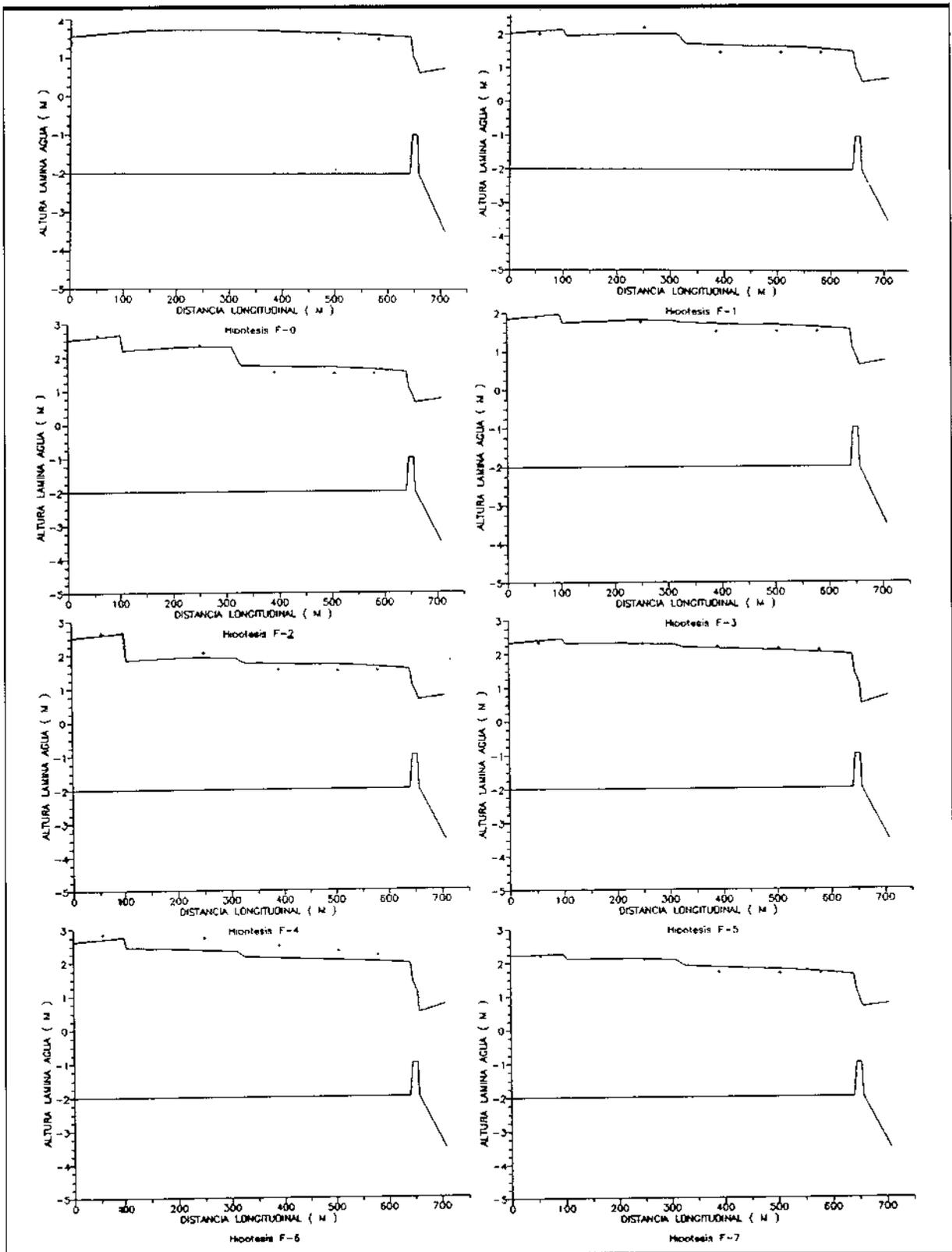


FIGURA 2.

cuado acuerdo entre las líneas de agua calculadas y observadas en el modelo físico. En la figura 2, se puede observar la bondad de los ajustes resumiendo en la tabla 2 los valores utilizados para los coeficientes de pérdidas y datos geométricos de las estructuras así como la cota de agua obtenida aguas arriba del puente de ferrocarril considerado.

Los ajustes obtenidos se consideran adecuados, observándose no obstante la necesidad de reducir los coeficientes de Manning de la escollera respecto a los que cabría esperar según las fórmulas empíricas indicadas anteriormente.

Este hecho es más explicable en los ensayos E-0 a E-6 dado que existía una pequeña distorsión de escalas al utilizar en los ensayos la de arrastres en vez de la escala de rugosidad. En el ensayo E-7 en que se trabajó con la escala de rugosidades no se produce esta distorsión y la reproducción del tamaño de la escollera debería permitir obtener el adecuado coeficiente de rugosidad con mayor validez que las fórmulas empíricas anteriores. Por este motivo en las simulaciones posteriores se ha utilizado el coeficiente de rugosidad obtenido en la calibración $n = 0,035$ en vez del resultante de las expresiones empíricas $n = 0,040$.

4. SIMULACION DE ACTUACIONES Y RESULTADOS OBTENIDOS

A continuación se ha calculado la lámina de agua, sin limitaciones de rasantes en los puentes de ferrocarril, para distintas hipótesis de perfil longitudinal y planta. Las soluciones estudiadas combinan las tres características siguientes:

- Solera horizontal hasta el azud sumergido en los supuestos de cota $-2,0$ m y $-2,5$ m.
- Pilas del puente de la autopista en la situación proyectada (ancho de pilas: 24 m) y en el supuesto de pilas esbeltas (ancho de pilas: 7 m).

- Anchura del cauce en base del azud sumergido de 138 m y 115 m, en lugar de los aproximadamente 200 m del actual proyecto.

En los trazados orientativos (plano n.º 5) se trató de respetar las edificaciones existentes en la margen derecha alineando dicho cajero con el actual estribo derecho del puente de la autopista que mantendría su actual función y con trazados alternativos para el cajero izquierdo. Hay que recordar, que la modelación matemática realizada, sólo considera el área y perímetro de las secciones transversales, por lo que el trazado en planta sólo influye en cuanto anchura del encauzamiento no pudiéndose estudiar efectos de sobreelevaciones debidos a curvaturas.

Los valores de parámetros utilizados, coinciden con los reflejados anteriormente en la hipótesis E-7 de la calibración resumiéndose en la tabla 3 la cota de la lámina de agua obtenida aguas arriba del puente del ferrocarril en las distintas alternativas analizadas.

En la simulación mediante modelo matemático de la solución final ensayada en modelo reducido (E-7 en la calibración) y que fue considerada entonces funcionalmente adecuada se obtuvo una cota de 2,26 m aguas arriba del puente de ferrocarril. Para obtener ese mismo resguardo debería elevarse la rasante de la parte infe-

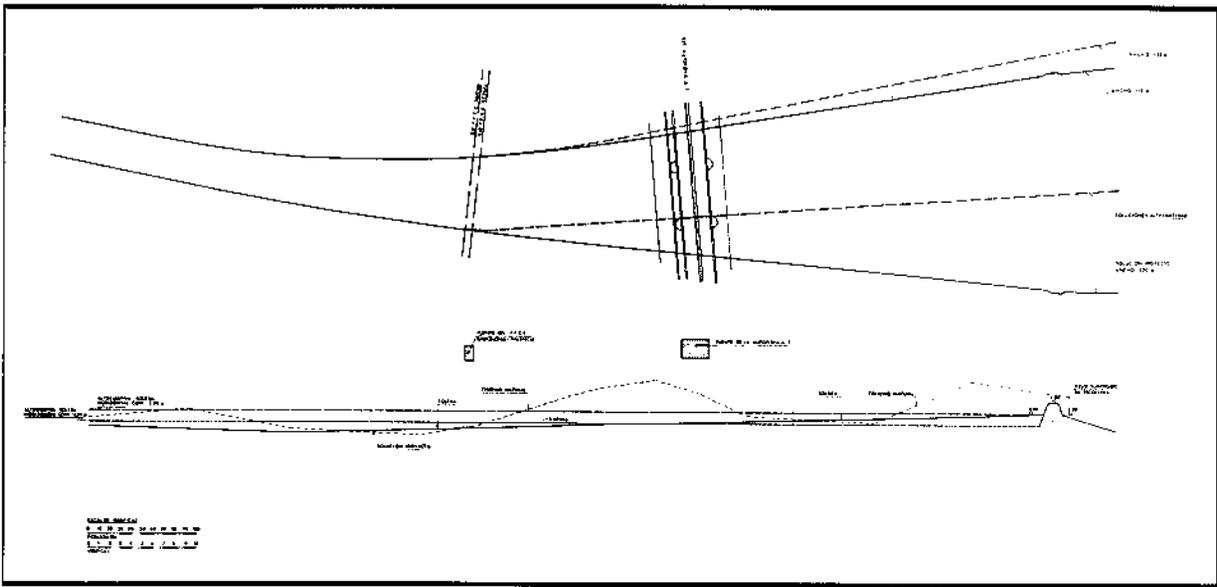
	ANCHURA 138 m	ANCHURA 115 m
SOLERA COTA $-2,0$ m		
Pilas gruesas puente autopista	3,97	4,41
Pilas esbeltas puente autopista	3,39	3,75
SOLERA COTA $-2,5$ m		
Pilas gruesas puente autopista	3,47	3,91
Pilas esbeltas puente autopista	3,10	3,49

TABLA 3.

Altura lámina de agua (m) aguas arriba puente ferrocarril.

	E-0	E-1	E-2	E-3	E-4	E-5	E-6	E-7
COEFICIENTES DE MANNING								
Tramo IV				0,030				0,035
Tramo V: fondo				0,035				0,045
cajeros				0,045				0,045
COEFICIENTES PERDIDAS								
Contracción				0,1				
Expansión				0,3				
PUENTE AUTOPISTA A-7								
Ancho pilas (m)	—	24,0	24,0	7,0	7,0	7,0	7,0	24,0
Coefficiente pilas	—	1,25	1,25	1,20	1,20	1,20	1,20	1,05
PUENTE FERROCARRIL								
Ancho pilas (m)	—	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Coefficiente pilas	—	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,00
ALTURA LAMINA DE AGUA AGUAS ARRIBA PUENTE DE FERROCARRIL	1,68	2,15	2,67	1,97	2,67	2,46	2,78	2,26

TABLA 2.



PLANO 5. Encauzamiento Carraixet. Desembocadura. Alternativas estudiadas.

rior del puente del ferrocarril un valor que se calculará restando dicha cota a las alturas de lámina obtenidas en las diferentes alternativas simuladas. Estas elevaciones del gálibo del puente respecto a la actual cota de 2.755 m existente en la vía impar se resumen en la tabla 4.

La consideración de cotas relativas, obtenidas por resta respecto a una situación dada, presenta la ventaja adicional de reducir posibles errores de la modelación, aumentando la fiabilidad de los resultados.

Los resultados mostrados en la tabla 4 permiten afirmar que unos puentes de ferrocarril con una disposición de pilas y longitudes de vanos análogas a las del existente actualmente en la vía impar, pero con un aumento de gálibo de 1,50 m (máximo valor considerado técnicamente viable por técnicos de RENFE) hacen posible unas soluciones de encauzamiento más económicas y con mejor funcionamiento hidráulico.

Aparece también clara la conveniencia de realizar cambios en el proyecto del futuro puente de Autopista A-7 reduciendo el espesor de las pilas centrales, lo que unido a la elevación de gálibo ya indicada en las es-

tructuras del ferrocarril permite disminuir el ancho máximo en el encauzamiento hasta los 115 m.

5. CONCLUSIONES

La utilización de un modelo matemático como el HEC-2, aprovechando resultados preexistentes de un modelo reducido para calibrar sus parámetros, ha permitido simular configuraciones del encauzamiento del barranco de Carraixet en la zona de su desembocadura, distintas a la proyectada y anteriormente ensayada en el CEH.

Esta modelación ha permitido cuantificar el aumento de gálibo requerido en las estructuras de ferrocarril para hacer viables soluciones del encauzamiento con una menor ocupación de suelo, reducción de aterramientos y eliminación de extensas e indeseables zonas de aguas muertas.

Los detalles del proyecto definitivo del encauzamiento y del nuevo puente de la Autopista A-7 acorde con aquél, deberán ser ensayados en el futuro en modelo reducido, pero los cálculos aquí descritos han posibilitado, en muy corto periodo de tiempo, alcanzar los objetivos deseados.

En este sentido, el uso combinado de modelos matemáticos y físicos permite una gran flexibilidad en el desarrollo de estudios de encauzamientos como el aquí presentado.

6. BIBLIOGRAFIA

1. EICHERT, B. S., y PETERS, J. C. (1970). «Computer Determination of Flow Through Bridges». ASCE, *J. Hyd. Div.*, vol. 96, n.º HY7.
2. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 1982. «HEC-2 Water Surface Profile». *Program Users Manual*, U.S. Army Corps of Engineers, California.

	ANCHURA 138 m	ANCHURA 115 m
SOLERA COTA -2,0 m		
Pilas gruesas puente autopista	1,71	2,15
Pilas esbeltas puente autopista	1,13	1,49
SOLERA COTA -2,5 m		
Pilas gruesas puente autopista	1,21	1,65
Pilas esbeltas puente autopista	0,84	1,23

TABLA 4.

Elevación necesaria de la parte inferior lml del puente de ferrocarril.