



Trabajo final de master:

**Estudio de las pilas del
viaducto 0.3B, en la
conexión de Mascara con la
autovía Este-Oeste. T.Mde
Mascara (Argelia)**

Valencia, julio de 2017

TITULACIÓN: Master en Ingeniería de caminos,
canales y puertos

CURSO: 2016/17

AUTOR: Sara Contel Martín

TUTOR: Julián Alcalá González

COTUTOR: Antonio Azorín Carrión

INDICE GENERAL

1. MEMORIA	1
2. ANEJO DE CÁLCULO	31
3. APÉNDICE I: RESULTADOS DE CÁLCULO	52
4. APÉNDICE II: PLANOS.....	203

MEMORIA

INDICE

1. OBJETO	3
2. INTRODUCCIÓN	3
3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PREVIA	3
3.1. SITUACIÓN DE LA OBRA.....	4
3.2. ANTECEDENTES	5
3.3. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA	8
3.4. PROCESO CONSTRUCTIVO	10
3.5. CONDICIONANTES ECONÓMICOS	12
3.6. PLANOS	13
4. PLANTEAMIENTO DE ALTERNATIVAS	13
4.1. PILAS EN SECCIÓN H.....	13
3.3.1. Descripción	13
3.3.2. Análisis estructural	14
3.3.3. Análisis económico.....	16
4.2. PILAS EN SECCIÓN HUECA.....	17
3.3.1. Descripción	17
3.3.2. Análisis estructural	18
3.3.3. Análisis económico.....	20
5. ESTUDIO COMPARATIVO	22
6. CONCLUSIONES	30

1. OBJETO

El objeto de este estudio es servir como Trabajo Fin de Máster de la titulación Master en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politècnica de València.

Para ello se propone la comparación estructural y económica entre dos secciones de pila para la misma estructura, el viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste en el T. M de Mascara (Argelia). Una de las secciones corresponde con la sección en H con la que se ha ejecutado el viaducto en la realidad y la otra sección, cuadrada y hueca, se propone en este estudio para que sirva de objeto de comparación con la original.

2. INTRODUCCIÓN

La estructura del estudio es la siguiente.

En primer lugar se presenta la información que se ha recopilado del viaducto cuyas pilas se pretende someter a comparación. Con toda la información recopilada se busca adquirir una concepción general acerca de su problemática, tanto de diseño como de construcción, a la que se ha visto sometida el y que, por tanto, ha condicionado la sección de pila finalmente ejecutada. En esta recopilación de la información se incluyen algunos aspectos económicos relativos al país donde tiene lugar el viaducto y a la ejecución de la obra que permitirán, más adelante, poder realizar una comparación económica.

Una vez explicados todas las características y condicionantes que establecen las bases del estudio, se procede a realizar un planteamiento a nivel geométrico, estructural y económico de la pila del viaducto, por un lado, y de la pila propuesta por otro, incorporando la justificación de su elección.

En base al planteamiento y análisis de ambas, se realiza un estudio comparativo en la que se destacan los aspectos más representativos de cada una de ellas para, finalmente, poder establecer unas conclusiones donde destacar la idoneidad o no de la sección del viaducto con respecto a la propuesta.

3. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN PREVIA

A continuación se expone toda la información recogida con referencia al Proyecto viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste en Mascara, Argelia.

Estudio de las pilas del Viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste. T. M. de Mascara (Argelia).

3.1. SITUACIÓN DE LA OBRA

Como se ha mencionado anteriormente, el viaducto objeto de este Estudio se encuentra localizado la provincia (Wilaya) de Mascara, al noroeste de Argelia.



Fig 1. Localización de la obra en la provincia de Mascara, Argelia



Fig 2. Autovía este-oeste (verde) y conexión Hacine-Mascara (flecha roja).

3.2. ANTECEDENTES

El tramo objeto de estudio se sitúa entre el PK 24+900 y el PK 29+200. Esta zona se caracteriza por la presencia de margas y arcillas. Todo este tramo está afectado por zonas de deslizamientos del terreno activos, tanto superficiales como profundos (ver Fig 3). Los efectos gravitatorios o un episodio de lluvia o seísmo pueden producir, en un momento dado, el desarrollo de estos deslizamientos del terreno, lo que conlleva a plantear diferentes alternativas de acción.



Fig 3. Zona de inestabilidad del terreno.
Fuente: LIC

En un primer momento se baraja la opción de construir la carretera directamente sobre el terreno. Para afrontar las inestabilidades del terreno reflejadas en la Fig 3 se presentan las siguiente soluciones:

Una de las opciones para evitar el deslizamiento potencial de la parte baja de la vertiente es el relleno parcial del fondo del valle. No obstante, esta solución eleva la cuña de deslizamiento del terreno, provocando una zona crítica en esta parte superior. (Ver Fig 4)

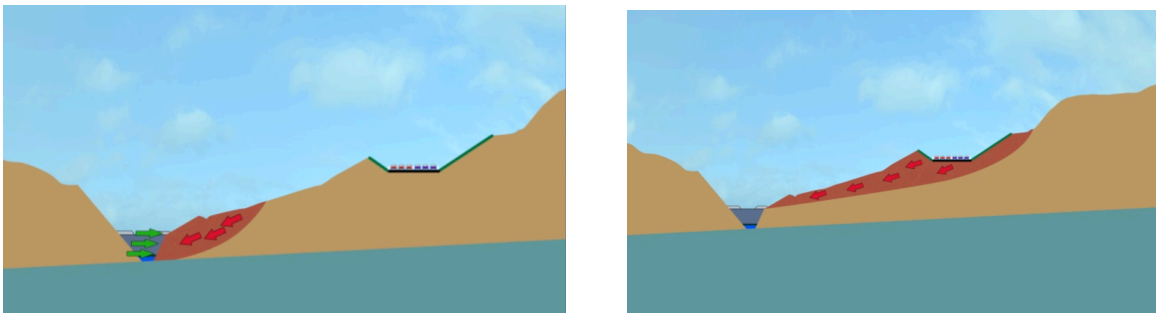


Fig 4. Solución 1: relleno parcial del valle (izquierda) y problemática (derecha).
Fuente: LIC

Al mismo tiempo, para hacer frente a las pequeñas inestabilidades detectadas en la parte más alta de la vertiente, se plantea, por un lado, una corrección puntual del terreno para aumentar el factor de seguridad de la zona. No obstante, la ejecución de la carretera, generaría otras inestabilidades no previstas que podrían evolucionar, a nivel local, y provocar situaciones críticas. (Ver Fig 5)

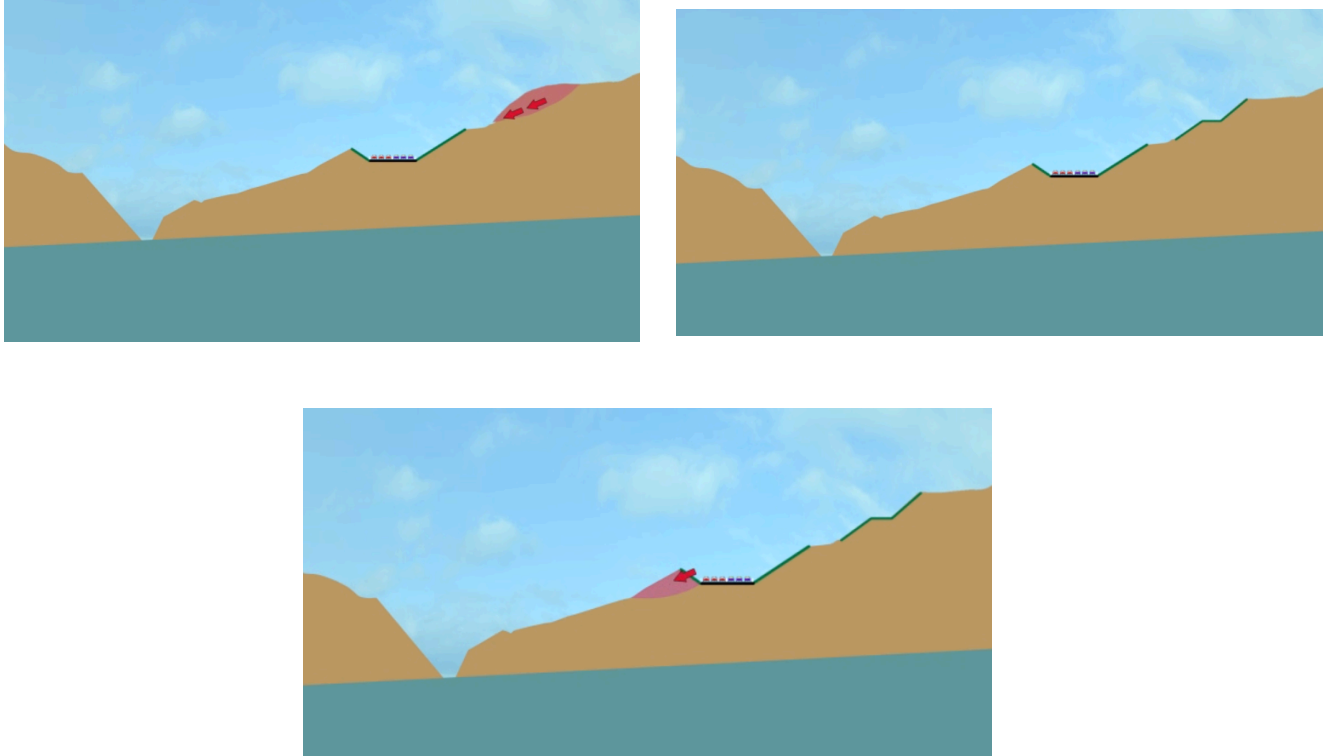


Fig 5. Solución 2.a: corrección local de inestabilidades (arriba derecha e izquierda) y problemática (abajo centro).
Fuente: LIC

Por otro lado, se plantea también una solución de tipo estructural en puntos localizados, con el objetivo de retener las tierras. Sin embargo, a pesar de este refuerzo estructural del terreno, el conjunto carretera-estructura podría generar cuñas de deslizamiento no previstas por debajo del refuerzo. (Ver Fig 6)

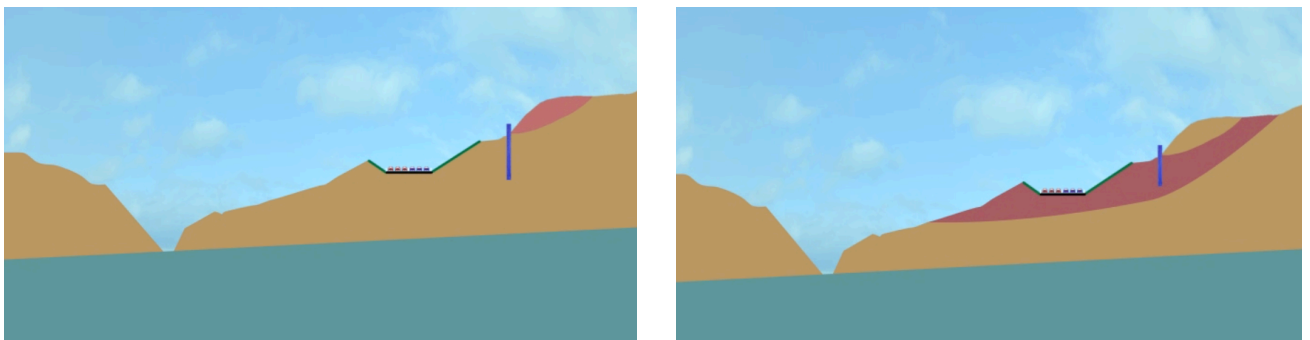


Fig 6. Solución 2.b: solución estructural local (izquierda) y problemática (derecha).
Fuente: LIC

Además, puesto que las inestabilidades del terreno comentadas aparecen en una zona muy amplia, tal y como se puede apreciar en la Fig 3, las soluciones planteadas para bloquear totalmente el movimiento de tierras por cualquiera de las anteriores opciones resulta imposible. Para asegurar la estabilidad del conjunto, estas actuaciones deberían ser de gran magnitud, como por ejemplo, rellenar totalmente el valle, lo que supondría una aportación muy elevada de material. (Ver Fig 7)

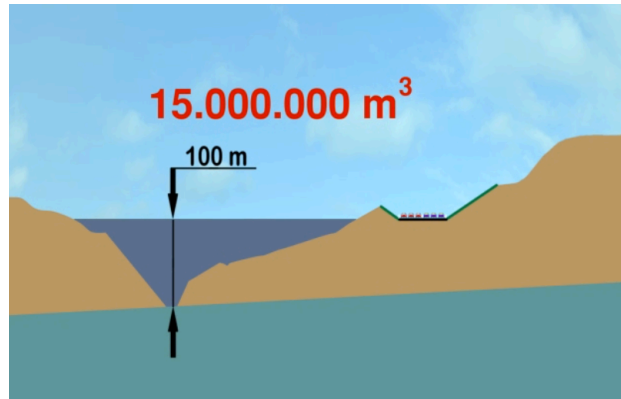


Fig 7. Solución para las inestabilidades de todo el valle.
Fuente: LIC

Debido a esta problemática, resulta razonable plantear otra solución alternativa para la construcción de la carretera. Esta alternativa debe asegurar la estabilidad del terreno y que la infraestructura no se vea afectada por los futuros movimientos. La solución planteada consiste en un viaducto localizado en la parte central del cauce, evitando de este modo, las zonas más inestables del valle. Esta solución se acompaña igualmente de soluciones locales para asegurar la estabilidad del terreno y evitar deslizamientos eventuales, como el relleno parcial del cauce, corrección localizada del terreno y refuerzo lateral en caso necesario. (Ver Fig 8)

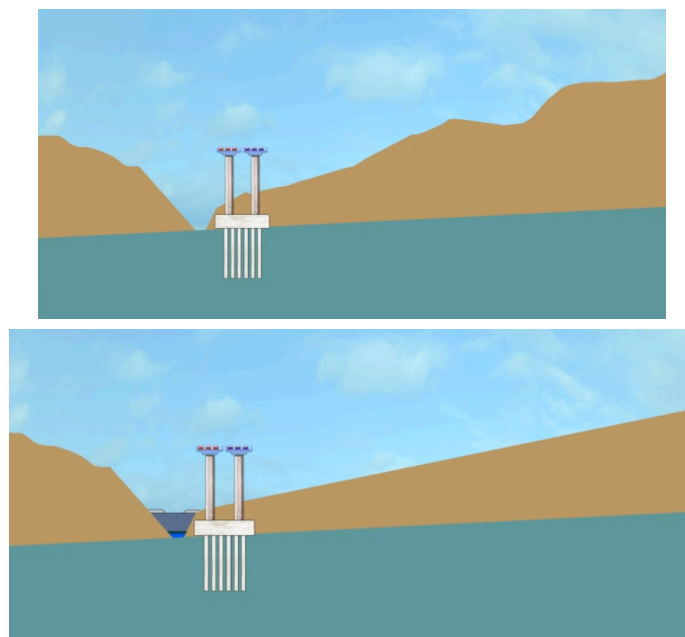


Fig 8. Variante de Viaducto (arriba) y soluciones locales para las inestabilidades (abajo). Fuente : LIC

Esta variante, paralela a la solución anteriormente planteada, esta compuesta por dos viaductos. El primero de una longitud de 640 m y un desnivel del 6% y el segundo de una longitud de aproximadamente 2010 m y una pendiente de 4,5%. Este segundo tramo es el considerado como objeto de este Estudio y comprende desde el PK 25+878 hasta el PK 27+787. (Ver Fig 9)



Fig 9. Comparación entre la proposición inicial (APD) y la variante finalmente ejecutada..
Fuente: LIC

3.3. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

El viaducto 0.3B está formado por dos viaductos paralelos para cubrir las dos direcciones de la marcha. En este estudio nos centraremos en el análisis del viaducto derecho, puesto que ambos son bastante similares.

Cada viaducto está formado por un tablero de hormigón pretensado con una sección de cajón de 14,0 m de ancho y 2,8 metros de alto. (Ver Fig 10)

La longitud del viaducto es de 1909,0 m entre ejes de estribos, dividido en 5 tramos hiperestáticos. Cada tramo hiperestático se encuentra, a su vez, dividido en subtramos de 40,0 y 50,0 metros de la siguiente forma: un primer subtramo de 40,0 m, seguido de 6 subtramos de 50,0 m y un subtramo final de 40,0 m. Por lo que cada tramo hiperestático se encuentra configurado por 8 subtramos, presentando una longitud total de 380 m. Además, la longitud de cada estos subtramos configura la distancia entre pilas. (Ver Fig 11)

Los apoyos del tablero a las pilas se realiza mediante 3 tipos de apoyo. El tipo 1 consiste en un apoyo libre, tipo carrito, entre las pilas y el tablero. El tipo 2 está configurado por un apoyo fijo entre las pilas y el tablero. El tipo 3 consiste en el apoyo de cada tramo hiperestático del tablero en la pila. Por tanto, esta pila contará con dos apoyos (uno de cada tramo) y será de tipo carrito. De este modo, todas las pilas se encuentran ligadas al tablero en la dirección transversal pero sólo algunas de ellas lo hacen en la dirección longitudinal. Por lo que respecta a las pilas, estas presentan una sección en H de 4,0 m de ancho y 5,2 de canto y una altura de pila variable en función de la variabilidad del terreno. En la Tabla 1 se muestra la altura final de cada pila, así como el la configuración del apoyo tablero-pila.

Estudio de las pilas del Viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste. T. M. de Mascara (Argelia).

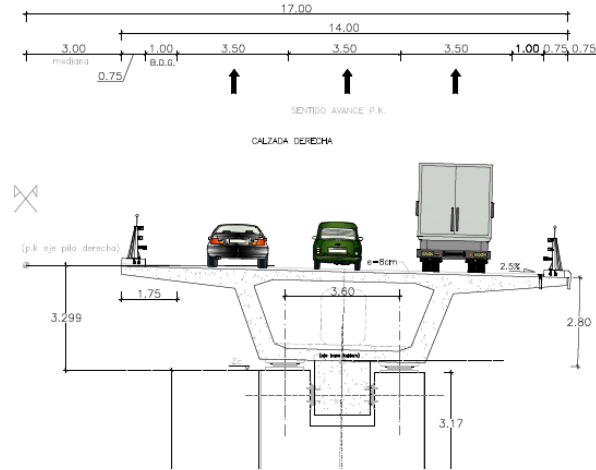


Fig 10. Sección transversal Viaducto.

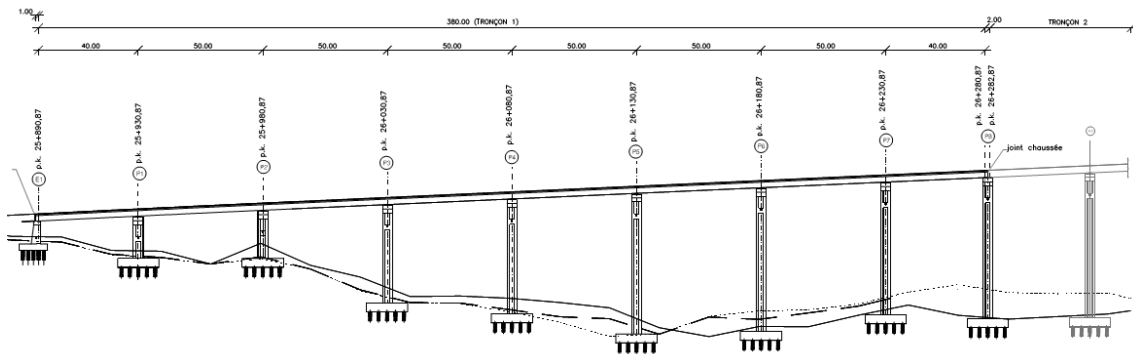


Fig 11. Primer tramo hiperestático. Subtramos 1+40,0 . 6x50,0 m y 1x40,0 m

	Long. Pila (m)	Apoyo		Long. Pila (m)	Apoyo
P01	12,33	TIPO 1	P21	24,54	TIPO 1
P02	28,79	TIPO 1	P22	22,7	TIPO 1
P03	33,76	TIPO 2	P23	17,67	TIPO 1
P04	43,87	TIPO 2	P24	20,73	TIPO 3
P05	46,12	TIPO 2	P25	22,28	TIPO 1
P06	45,72	TIPO 1	P26	21,35	TIPO 1
P07	45,06	TIPO 1	P27	24,76	TIPO 2
P08	45,79	TIPO 3	P28	28,78	TIPO 2
P09	45,92	TIPO 1	P29	27,24	TIPO 2
P10	45,65	TIPO 1	P30	23,81	TIPO 1
P11	45,68	TIPO 2	P31	18,97	TIPO 1
P12	44,72	TIPO 2	P32	19,11	TIPO 3
P13	43,85	TIPO 2	P33	19,84	TIPO 1
P14	41,78	TIPO 1	P34	19,47	TIPO 1
P15	27,86	TIPO 1	P35	10,2	TIPO 1
P16	27,24	TIPO 3	P36	13,31	TIPO 2
P17	23,88	TIPO 1	P37	17,43	TIPO 2
P18	29,34	TIPO 1	P38	14,8	TIPO 1
P19	36,91	TIPO 2	P39	9,13	TIPO 1
P20	28,57	TIPO 2			

Tabla 1. Altura de las pilas y conexiones pila-tablero.

3.4. PROCESO CONSTRUCTIVO

El proceso constructivo constituye un aspecto muy relevante del estudio, puesto que interfiere en el tiempo total de ejecución de la obra y, en consecuencia, en el aspecto económico del Estudio.

El procedimiento constructivo que se ha seguido es el siguiente:

En primer lugar se excava la base para preparar la cimentación. Una vez finalizada la excavación se ejecuta la cimentación. Para ello se perforan los pilotes, se introduce la armadura y se hormigona. Finalizada la ejecución de la cimentación, se coloca la ferralla de la zapata de la pila, junto con las esperas de la misma, se encofra toda la base y se vierte el hormigón. Con la zapata hormigonada, se procede a elevar la pila.

La ejecución de las pilas se lleva a cabo a través de encofrados deslizantes y se ejecutará en tramos de 5 metros excepto en el arranque, donde se colocará un tramo con la longitud necesaria para completar la altura total de la pila (ver Fig 12 y Fig 13). Para cada tramo se coloca la armadura y la trepa con el encofrado y se rellena con hormigón mediante bomba. Cada tramo necesita dos días para completarse con los equipos definidos. Cuando el hormigón alcanza la resistencia suficiente, la trepa se eleva lista para ejecutar el tramo siguiente.



Fig 12. Ejecución de las pilas mediante trepas.
Fuente: LIC

Estudio de las pilas del Viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste. T. M. de Mascara (Argelia).



Fig 13. Sección de arranque con encofrado especial.
Fuente: LIC

Hasta que no finaliza la ejecución de la pila, no se procede a colocar el tablero mediante autocimbras. (ver Fig 14).



Fig 14. Ejecución del tablero con autocimbra.
Fuente: LIC.

El principal problema que presenta el proceso constructivo es que las pilas constituyen el camino crítico de la obra, ya que se trata de un viaducto de unos 2000 metros de longitud con una longitud total de las pilas de 1118 m. Por tanto, la principal problemática a la hora de ejecutar el proyecto ha sido el tiempo de construcción de las estas, ya que su ejecución condiciona la puesta final del tablero.

Este condicionante ha sido fundamental a la hora del diseño de la pila, y es por esto por lo que se ha optado por una con geometría en H en vez de hueca, puesto que de este modo se evita el encofrado interior con el ahorro de tiempo a la hora de deslizar las trepas. Este ahorro de tiempo en cada pila permite ejecutar la totalidad del viaducto en un tiempo menor, reduciendo, a su vez, el tiempo de espera para colocar el tablero.

3.5. CONDICIONANTES ECONÓMICOS

Centrándonos en las pilas, en su ejecución se han considerado los siguientes supuestos:

- Las pilas se construyen en tramos de 5 m, excepto la sección de arranque que tendrá la altura necesaria para completar la altura total de la pila.
- El tiempo de ejecución por cada tramo es de 2 días.
- Cada equipo de trabajo para la ejecución de una pila está formado por:
 - Tres oficiales extranjero
 - Un oficial argelino
 - Un peón argelino
- Puesto que las pilas constituyen el camino crítico, se emplean 4 equipos de trabajo simultáneo, lo que se traduce en 4 pilas construyéndose al mismo tiempo.
- Los costes unitarios considerados son:

Costes Unitarios (Dinar)

Mano de obra

hr	Oficial extranjero	1605,0
hr	Oficial argelino	535,0
hr	Obrero argelino	321,0

Maquinaria

hr	Grúa 60 T	7000,0
hr	Grúa 100 T	11000,0
hr	Bomba 45 m	15000,0
hr	Camión plataforma	1500,0

Material

m3	Hormigón C27	8774,0
kg	Armadura pasiva	53,2

Tabla 2. Costes unitarios en dinar.

3.6. PLANOS

En el Apéndice II del Anejo de Cálculo se incluyen los planos del Viaducto 0.3B en la conexión de la autopista Este-Oeste de Mascara y que han servido de base para llevar a cabo el cálculo estructural del mismo.

4. PLANTEAMIENTO DE LAS ALTERNATIVAS

Establecidas las bases del Estudio, se procede a presentar y analizar las secciones que van a ser objeto de comparación.

4.1. PILAS EN SECCIÓN H

Las pilas con sección en H, como se ha mencionado anteriormente, son las que se han ejecutado realmente en el Proyecto del viaducto 0.3B. Por tanto, las características geométricas de esta sección venían predefinidas y sólo se ha procedido a llevar a cabo un análisis estructural y económico de la misma.

4.1.1. Descripción

La sección en H presenta las siguientes dimensiones:

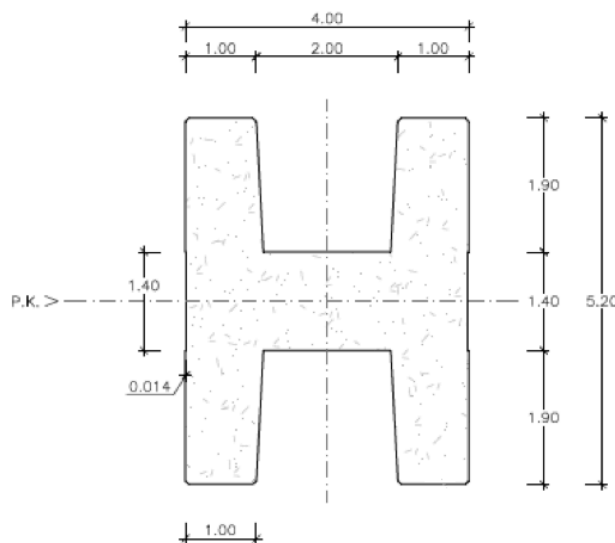


Fig 15. Sección tipo H

En cuanto a sus características mecánicas se destacan:

Sección H	
Perímetro (m)	25,44
Área (m²)	13,5308
I_x (m⁴)	24,575
I_y (m⁴)	25,3755

Tabla 3. Características sección H

Como puede observarse, las inercias en ambas direcciones son muy similares, hecho que condicionará posteriormente el diseño de la sección hueca propuesta.

Las pilas están construidas con hormigón armado C27/33. Las características del material se especifican en el Anejo de Cálculo.

4.1.2. Análisis estructural

El análisis estructural de la pila se ha llevado a cabo conjuntamente con el resto de la estructura del viaducto, es decir, se ha modelado tanto el tablero como las pilas como las conexiones entre ambos elementos con el objetivo de obtener la respuesta real de las mismas frente a las solicitaciones a las que estará sometida la totalidad de la estructura. (Ver Fig 16). No obstante, puesto que el objeto del estudio es la comparación entre las secciones de las pilas, sólo se expondrán los resultados relativos a las mismas.

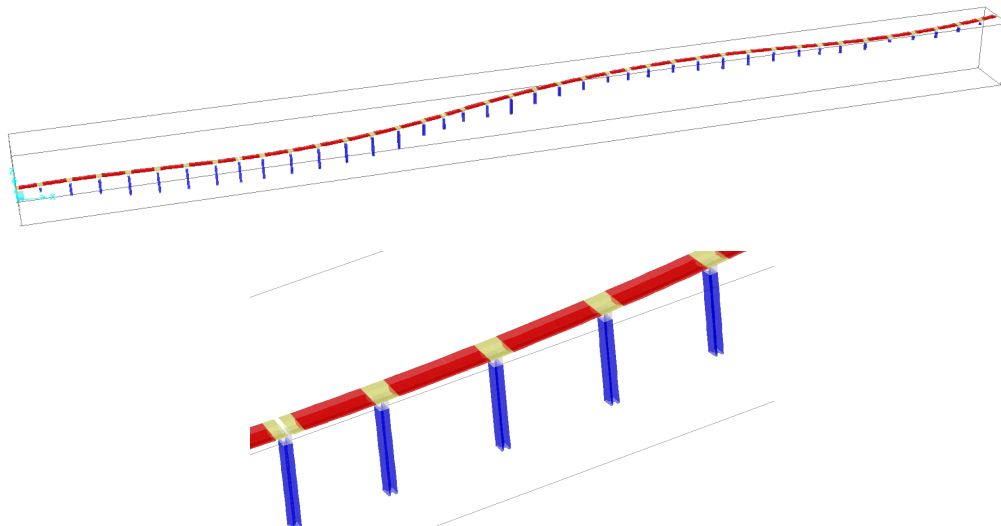
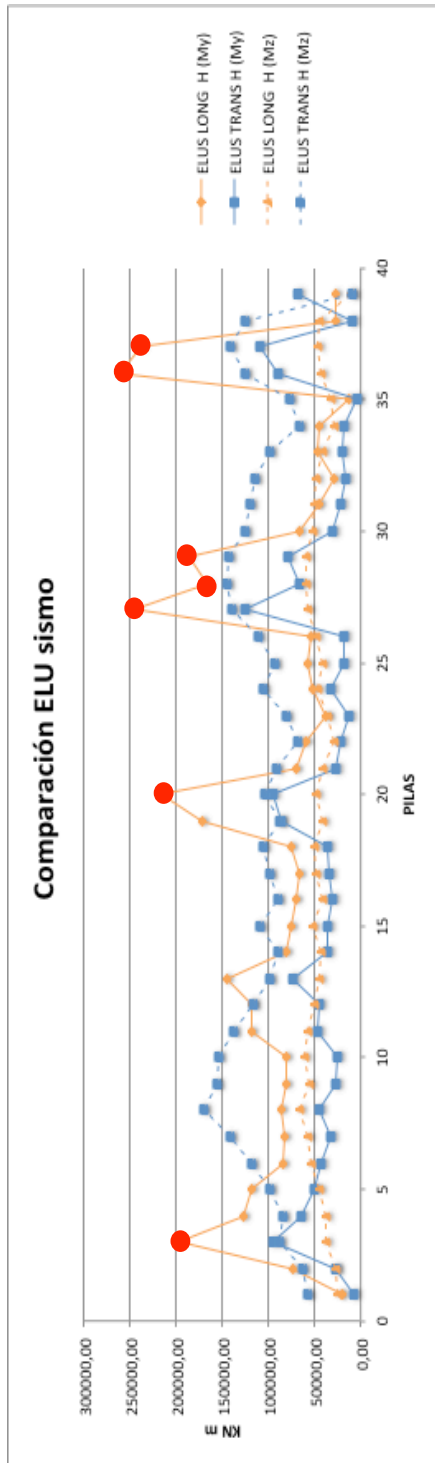


Fig 16. Modelo introducido en SAP 2000 (arriba) y detalle de las secciones en H (abajo).

En el Anejo de cálculo queda explicado el procedimiento y bases de cálculo que se han tenido. En el Apéndice I se incluyen los resultados de los esfuerzos obtenidos para las diferentes combinaciones de acciones planteadas. De entre todas ellas, las que proporcionan un valor mayor de los esfuerzos y, por tanto, condicionan el diseño de las armaduras, son la combinación ELU de sismo longitudinal y la combinación ELU de sismo transversal. En función de las características de la pila, especialmente su altura y conexión con el tablero, las dos combinaciones anteriormente mencionadas adquieren mayor o menor relevancia, como se expone a continuación (Ver gráfica 1).

Las pilas con conexión pila-tablero tipo 1 (carrito) presentan mayores valores de esfuerzos para el ELU de sismo transversal. Especialmente las pilas más altas (P06 a P12), mientras que las pilas con conexión pila-tablero tipo 2 (fija) son más elevados los esfuerzos para el ELU de sismo longitudinal, especialmente en el caso de las pilas cortas. Estos resultados son coherentes si se interpreta el comportamiento de las mismas: en el caso de las pilas libres, especialmente las altas, debido a la conexión y la longitud desarrollan mayores esfuerzos frente al sismo transversal, mientras que las pilas fijas, estas absorben los esfuerzos en la dirección de la directriz del tablero de las

pilas libres que tienen alrededor, incrementando, así, la repercusión del sismo longitudinal sobre ellas. Este efecto último es especialmente acusado en las pilas fijas cortas, donde la menor longitud de la pila impide la disipación de los esfuerzos a lo largo de la misma y acaban concentrando reacciones en la base de la pila notablemente mayores que en el resto (puntos señalados en rojo en la gráfica 1). Es en estas pilas donde se ha llevado a cabo un análisis de comportamiento dúctil para poder introducir rótulas plásticas en la base de las mismas, siguiendo lo establecido en el Anejo de cálculo.



	My		Mz	
	ELUS LONG H	ELUS TRANS H	ELUS LONG H	ELUS TRANS H
P01	19527,33	6612,65	24788,08	56593,67
P02	73831,22	27184,46	27088,34	63204,51
P03	196532,18	94150,78	38260,50	88173,59
P04	126147,12	65083,26	37350,18	83758,46
P05	117182,61	50602,00	44436,84	97833,90
P06	83802,16	42549,42	54334,86	117664,49
P07	81562,80	32702,68	57476,31	141357,68
P08	85788,06	43969,71	65506,61	168617,21
P09	81030,08	27692,00	56276,86	155093,35
P10	79939,71	24356,88	60406,65	153443,09
P11	117765,43	46735,00	58055,11	137977,57
P12	117891,18	45104,48	50971,17	116413,05
P13	144540,47	73462,67	45279,15	98588,21
P14	81000,74	35655,06	42908,75	88727,35
P15	74825,51	35550,54	51215,97	107968,55
P16	68899,87	31250,34	40868,41	88627,57
P17	66665,03	34332,54	47811,38	97495,25
P18	75386,15	36703,09	49982,74	105660,00
P19	171710,06	85886,25	40900,48	87160,80
P20	216162,84	95343,91	47601,74	102644,19
P21	69070,63	27724,67	40511,13	91642,78
P22	59600,51	22190,57	29387,37	68347,18
P23	37803,06	12958,44	35424,29	80142,00
P24	52245,78	32809,44	45779,53	105644,58
P25	56563,39	17347,53	40820,31	92634,35
P26	52857,41	17803,12	48724,06	110509,87
P27	243429,10	124473,00	57424,13	138605,25
P28	165173,78	66394,47	58953,76	144666,97
P29	184743,01	78851,39	59232,30	143094,39
P30	65938,44	29865,34	52551,05	124200,83
P31	44050,07	21197,74	49769,05	118816,91
P32	29612,83	16281,75	48739,17	114443,52
P33	47333,17	20089,49	41406,31	97372,37
P34	45470,97	17682,99	29099,03	65401,75
P35	12443,21	4389,80	33070,82	76170,63
P36	259362,45	90078,49	43782,07	125054,28
P37	236350,87	108192,24	46802,98	140478,75
P38	27836,69	9968,48	43894,72	125422,21
P39	27531,57	67788,05	11598,41	9898,69

Gráfico 1. Comparación de momentos debidos a sismo longitudinal y transversal de las pilas con sección H

En las Tablas 1.2 a 1.9 del Apéndice I se muestran los resultados de los esfuerzos obtenidos para todas las combinaciones.

Una vez conocido los esfuerzos más desfavorables para cada pila, se ha procedido a calcular la armadura de la sección. En el plano 3 del Apéndice II se muestra el armado de los 4 Tipos diseñados para la sección y en el Anejo de Cálculo, apartado 3.3, se explica la forma en la que se ha obtenido dichos armados.

4.1.3. Análisis económico

En base a los condicionantes económicos mencionados en el apartado 3.6 de este texto, se ha procedido a valorar económicamente las unidades de obra necesarias para ejecutar la pila.

Long tramo (m)	5
Nº tramos (fases)	193
Tiempo ejecución/tramo (días)	2
Nº pilas	39
Long total pilas (m)	1118,94
Nº de equipos	4
Tiempo ejecución total (días)	97
Perímetro sección (m)	25,45
Área (m2)	13,53
Vc total (m3)	13411,03
Acero pasivo total (kg)	1100282,91

Tabla 4. Condicionantes para la valoración

Conocida esta información, el resumen de la valoración de las unidades de obras más representativas se muestra a continuación:

UO 01 m2 encofrado

	unidades	horas/día	días	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	12	10	97	970	1605,00	18682200,00
Oficial argelino	4	10	97	970	535,00	2075800,00
Peón argelino	4	10	97	970	321,00	1245480,00
Máquinaria						
Grúa 60 tn	4	8	55	440	7000,00	12320000,00
Grúa 100 tn	4	8	42	336	11000,00	14784000,00
Encofrado (fabricación)					33200000,00	33200000,00
Medios auxiliares (15%)						12346122,00

Costes directos	94653602,00 dinar
	884613,10 €
Costes indirectos (7% s/ coste directo)	61922,92 €
Coste total	946536,02 €
	33,24 €/m2

Estudio de las pilas del Viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste. T. M. de Mascara (Argelia).

UO 02 m3 hormigón

	unidades	horas/fase	fases	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	3	3	193	579	1605,00	2787885,00
Oficial argelino	1	3	193	579	535,00	309765,00
Peón argelino	1	3	193	579	321,00	185859,00
Máquinaria						
Bomba 45 m	1	3	193	579	15000,00	8685000,00
Grúa 100 tn	1	8	49	392	11000,00	4312000,00
Suministro hormigón					8774,00	117668367,00
Medios auxiliares (2,5%)						3348721,90

Costes directos	137297597,90 dinar
Costes indirectos (7% s/ coste directo)	1283155,12 €
Coste total	89820,86 €
	1372975,98 €
	102,38 €/m3

UO 03 kg acero

	unidades	horas/día	días	horas totales	CU (h)	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial ferralla extranjero	6	10	97	970	1605,00	9341100,00
Peón ferralla argelino	6	10	97	970	321,00	1868220,00
Máquinaria						
Grúa 60 tn	1	8	97	776	7000,00	5432000,00
Camión plataforma	1	8	97	776	1500,00	1164000,00
Suministro Acero					53,16	58491039,58
Medios auxiliares (7%)						5340745,17

Costes directos	81637104,75 dinar
Costes indirectos (7% s/ coste directo)	762963,60 €
coste total	53407,45 €
	816371,05 €
	0,74 €/kg

Lo que supone un coste total de ejecución de las pilas de tres millones ciento treinta y cinco mil ochocientos ochenta y tres con euros (3.135.883,05 €).

4.2. PILAS EN SECCIÓN HUECA

Las pilas en sección hueca son las que se incorporan al estudio para poder realizar una comparación con respecto a las anteriores. A continuación se detallan sus características.

4.2.1. Descripción

Para la sección de comparación se propone una sección cuadrangular hueca, más comúnmente empleadas en la ejecución de viaductos en España. El principal objetivo a la hora de definir la nueva sección ha sido mantener el mismo comportamiento mecánico que en la sección en H, para ello ha sido muy condicionante conseguir unos valores de inercia en ambos ejes similares a la sección anterior, ya que en ambas pilas se va a utilizar el mismo material para su diseño y, por tanto, la resistencia de ambas será la misma. Para conseguir este objetivo y puesto que las inercias de la sección H son

muy similares en ambas direcciones, ha sido necesario recurrir a una sección cuadrada hueca:

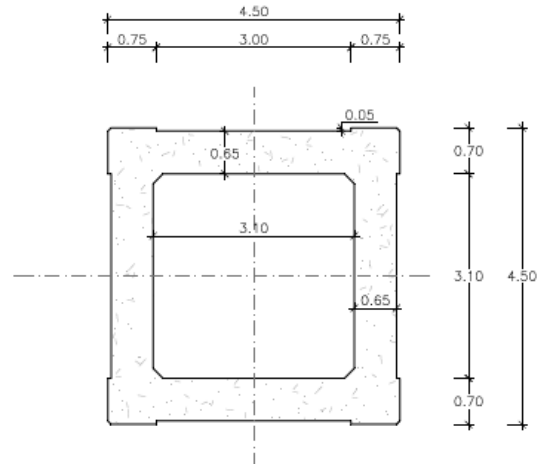


Fig 17. Sección tipo Hueca

De este modo y con esta geometría, las características mecánicas de la sección hueca resultan:

	Sección H	Sección hueca
Perímetro (m)	25,44	30,33
Área (m²)	13,53	10,07
I_x (m⁴)	24,575	24,8187
I_y (m⁴)	25,3755	25,0191

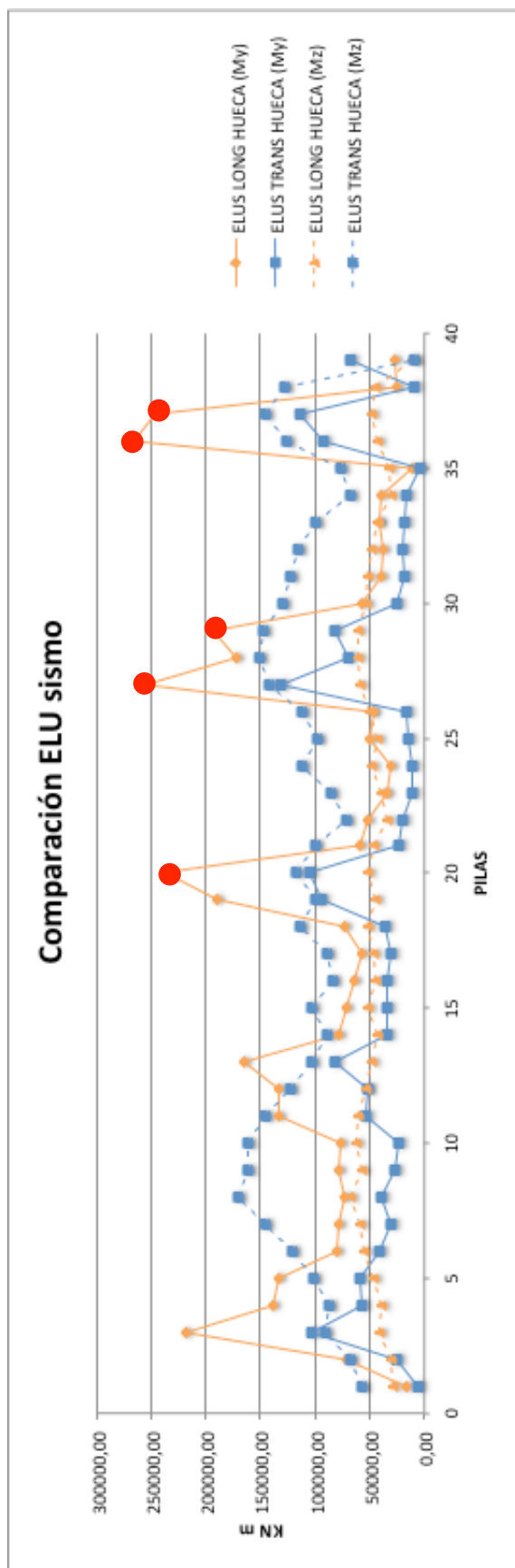
Tabla 5. Comparación características aracterísticas sección H y Hueca

Como puede observarse, las inercias de ambas secciones están bastante ajustadas, lo que permitirá un comportamiento mecánico similar. No obstante, el área de la sección hueca es menor que la sección H.

Del mismo modo que en las pilas anteriormente definidas, estas pilas se dimensionarán con hormigón armado C27/33. Las características del material se especifican en el Anejo de Cálculo.

4.2.2. Análisis estructural

Las hipótesis relativas al análisis estructural de las pilas en sección hueca son iguales a las consideradas para las pilas con sección en H, es decir, se modela el viaducto entero y se somete a las solicitaciones a las que estará sometido el viaducto en la realidad y definidas en el Anejo de cálculo, con lo que se consigue que la comparación sea lo más real posible. (Ver Fig 18).



	My		Mz	
	ELUS LONG HUECA	ELUS TRANS HUECA	ELUS LONG HUECA	ELUS TRANS HUECA
P01	17087,07	5786,13	28021,71	57862,05
P02	70433,98	25934,17	31308,44	67555,66
P03	218151,98	103890,63	41349,03	91501,87
P04	138445,22	57897,91	38969,59	86525,03
P05	133511,73	58482,32	46198,97	101821,76
P06	80273,57	41446,60	55550,42	121557,51
P07	78043,72	31291,65	59569,14	144981,07
P08	72247,89	39030,76	67005,34	170963,24
P09	77435,51	26463,56	57665,65	160887,55
P10	76423,68	23285,59	62989,63	160810,88
P11	133125,28	53482,49	60981,92	145381,06
P12	132681,13	51300,26	53318,57	123286,30
P13	164680,28	82174,70	47906,69	103485,23
P14	77557,94	34139,61	43154,04	88963,25
P15	70678,43	33579,29	50974,75	102296,74
P16	63890,80	34021,15	44344,75	83384,05
P17	57749,01	29741,10	47267,00	89334,99
P18	72400,98	35249,72	51307,77	112941,74
P19	190016,03	94029,51	43820,64	99523,73
P20	238261,59	104894,55	52205,22	116563,65
P21	59715,03	23969,94	46004,34	99976,08
P22	51794,13	19283,65	33731,01	71730,31
P23	33411,01	11453,19	38627,76	85719,95
P24	30683,71	10536,72	47468,19	112243,35
P25	49216,25	15094,65	42862,13	98346,51
P26	46120,70	15534,09	49644,34	112671,64
P27	255321,00	131839,46	59106,61	142333,34
P28	172642,01	69341,74	61146,88	150372,17
P29	193000,94	82479,33	61309,34	148029,15
P30	57127,08	25874,83	54312,63	128755,84
P31	38742,30	18643,25	51019,09	122518,46
P32	37142,51	20004,99	48237,98	115483,87
P33	41499,50	17612,82	42266,95	99632,72
P34	39910,14	15519,81	29732,31	67324,80
P35	11116,50	3921,74	31797,13	76696,88
P36	265465,97	92320,64	43574,31	126797,47
P37	246542,87	113713,96	48403,19	145823,96
P38	24902,78	8917,68	44627,38	128555,78
P39	26520,7431	68174,00	10694,2588	9688,08

Gráfico 2. Comparación de momentos debidos a sismo longitudinal y transversal de las pilas con sección hueca

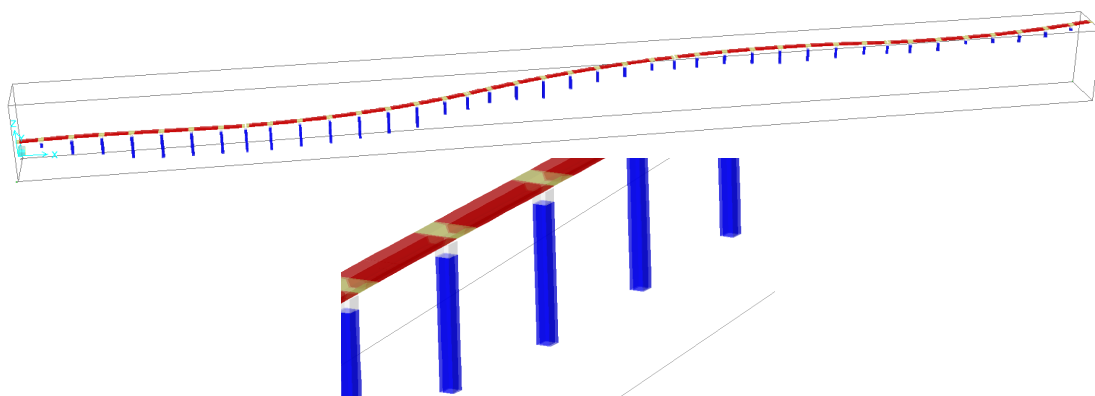


Fig 18. Modelo introducido en SAP 2000 (arriba) y detalle de las secciones en huecas (abajo).

En cuanto a los resultados del cálculo obtenidos para esta sección, estos se muestran también en el Apéndice I y puede aplicarse la misma explicación dada anteriormente para las pilas con sección en H para determinar el comportamiento de las pilas huecas. No obstante, en este caso, las pilas sometidas a un análisis de comportamiento dúctil sean menores, reduciéndose a las pilas 20, 27, 29, 36 y 37. (Ver gráfica 2).

En lo que respecta al armado de estas pilas, se ha llevado del mismo modo que en las de sección en H y tal y como se detalla en el Anejo de Cálculo. Del mismo modo, en el plano 4 del Apéndice II se muestran los Tipos de armado diseñados para esta sección.

Destacar, que cada Tipo de armado propuesto para ambas secciones contiene exactamente la misma cuantía de acero, con el objetivo de conseguir una comparación más eficaz.

4.2.3. Análisis económico

Para el análisis económico se consideran los mismos supuestos de partida que en la pila H pero con ligeras modificaciones derivadas de la diferencia geométrica.

Long tramo (m)	5
Nº tramos (fases)	193
Tiempo ejecución/tramo (días)	3
Nº pilas	39
Long total pilas (m)	1118,94
Nº de equipos	4
Tiempo ejecución total (días)	145
Perímetro sección (m)	30,33
Área (m ²)	10,07
Vc hormigón total (m ³)	9981,45
Acero pasivo total (kg)	1082894,90

Tabla 6. Condicionantes para la valoración

En rojo se señalan los cambios introducidos con respecto a la sección en H. En primer lugar el tiempo de ejecución por tramo aumenta a 3 días, puesto que ahora es necesario deslizar también el encofrado interior de la sección. Esto provoca que el tiempo total de ejecución de las pilas se incremente a los 145 días.

Estudio de las pilas del Viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste. T. M. de Mascara (Argelia).

En base a estos condicionantes, la valoración de las unidades de obra más representativas es:

UO 01 m2 encofrado

	unidades	horas/día	días	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	12	10	145	1450	1605	27927000
Oficial argelino	4	10	145	1450	535	3103000
Peón argelino	8	10	145	1450	321	3723600
Máquinaria						
Grúa 60 tn	4	8	74	592	7000	16576000
Grúa 100 tn	4	8	71	568	11000	24992000
Encofrado (fabricación)						41500000
Medios auxiliares (15%)						17673240,00

Costes directos	135494840,00 dinar
	1266306,92 €
Costes indirectos (7% s/ coste directo)	88641,48 €
Coste total	1354948,40 €
	39,92 €/m2

En rojo se señala el coste de fabricación del encofrado deslizante, el cual se ha incrementado para incluir el encofrado de las caras interiores de la sección.

UO 02 m3 hormigón

	unidades	horas/fase	fases	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	3	3	193	579	1605	2787885
Oficial argelino	1	3	193	579	535	309765
Peón argelino	2	3	193	579	321	371718
Máquinaria						
Bomba 45 m	1	3	193	579	15000	8685000
Grúa 100 tn	1	8	49	392	11000	4312000
Suministro hormigón					8774	87577269,45
Medios auxiliares (2,5%)						2601090,936

Costes directos	106644728,4 dinar
	996679,70 €
Costes indirectos (7% s/ coste directo)	69767,58 €
Coste total	1066447,28 €
	106,84 €/m3

UO 03 kg acero

	unidades	horas/día	días	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	6	10	145	1450	1605	13963500
Peón argelino	6	10	145	1450	321	2792700
Máquinaria						
Grúa 60 tn	1	8	145	1160	7000	8120000
Camión plataforma	1	8	145	1160	1500	1740000
Suministro Acero					53,16	57566692,69
Medios auxiliares (7%)						5892802,488

Costes directos	90075695,18 dinar
	841828,9269 €
Costes indirectos (7% s/ coste directo)	58928,02488 €
Coste total	900756,9518 €
	0,83 €/kg

Lo que supone un Coste Total de ejecución de las pilas de tres millones trescientos veintidós mil ciento cincuenta y dos mil euros (3.322.152,64 €).

5. ESTUDIO COMPARATIVO

En primer lugar se procede a realizar una comparación del comportamiento estructural entre ambas secciones. Para facilitar esta comparación se muestran las gráficas 1 a 5, donde aparecen simultáneamente representados los esfuerzos de la sección H y de la sección hueca. Se entiende por:

- ELU A: ELU Permanente + Tráfico + Térmicas
- ELU B: ELU Permanente + Tráfico + Viento
- ELU C: ELU Permanente + Viento
- ELU S: ELU sismo (long, trans o vert)
-

Además, la línea continua representa la sección H mientras que la discontinua representa la sección hueca.

En el Gráfico 3 se representan los axiles de ambas secciones para todas las combinaciones analizadas. Como puede observarse, el comportamiento es homólogo para las diferentes combinaciones, existiendo un valle en las pilas del final de los tramos hiperestáticos. Centrando la comparación entre la H y la Hueca (continua vs. discontinua) ambas presentan unos valores de axil muy similares ya que, en última instancia, éste dependerá de lo que te tenga la pila por encima de ella y para ambas es el mismo tablero y las mismas cargas.

En los Gráficos 4 y 5 se muestran los resultados de los cortantes en ambas direcciones. En ambas gráficas se vuelve a observar el comportamiento homólogo de las diferentes combinaciones. En el caso del cortante en la dirección y (Gráfico 4) predomina el originado por el ELU de sismo transversal, tanto para la hueca como para la H. Dentro de éstas, la diferencia entre ellas es insignificante si bien los cortantes de la H (continua) suelen ser mayores que los de la Hueca (discontinua) en algunas pilas sucede lo contrario. Para la dirección z de los cortantes (Gráfico 5) los mayores valores son los obtenidos por el ELU de sismo longitudinal y la diferencia entre ambas secciones vuelve a ser insignificante.

En los Gráficos 6 y 7 se observan los resultados de los momentos en ambas direcciones. También en ellos se puede apreciar un comportamiento homólogo de todas las combinaciones si bien no tan acusado como en los casos anteriores. En el caso del momento en la dirección y (Gráfico 6) los valores más elevados son los correspondientes a los del ELU de sismo longitudinal, donde la sección en H y la hueca vuelven a presentar valores muy similares y prácticamente superpuestos, aunque la hueca presenta, en la mayoría, de casos valores algo superiores.

Observando esta gráfica también se observa el comportamiento de las pilas fijas, coincidiendo con los picos de esfuerzos y donde en algunos casos ha sido necesario introducir rótulas plásticas y asumir un comportamiento dúctil.

En el caso de los momentos en la dirección z (Gráfica 7) son los valores del ELU de sismo transversal los más altos y se observa que en este caso la sección hueca presenta valores ligeramente superiores, aunque muy similares, que la H.

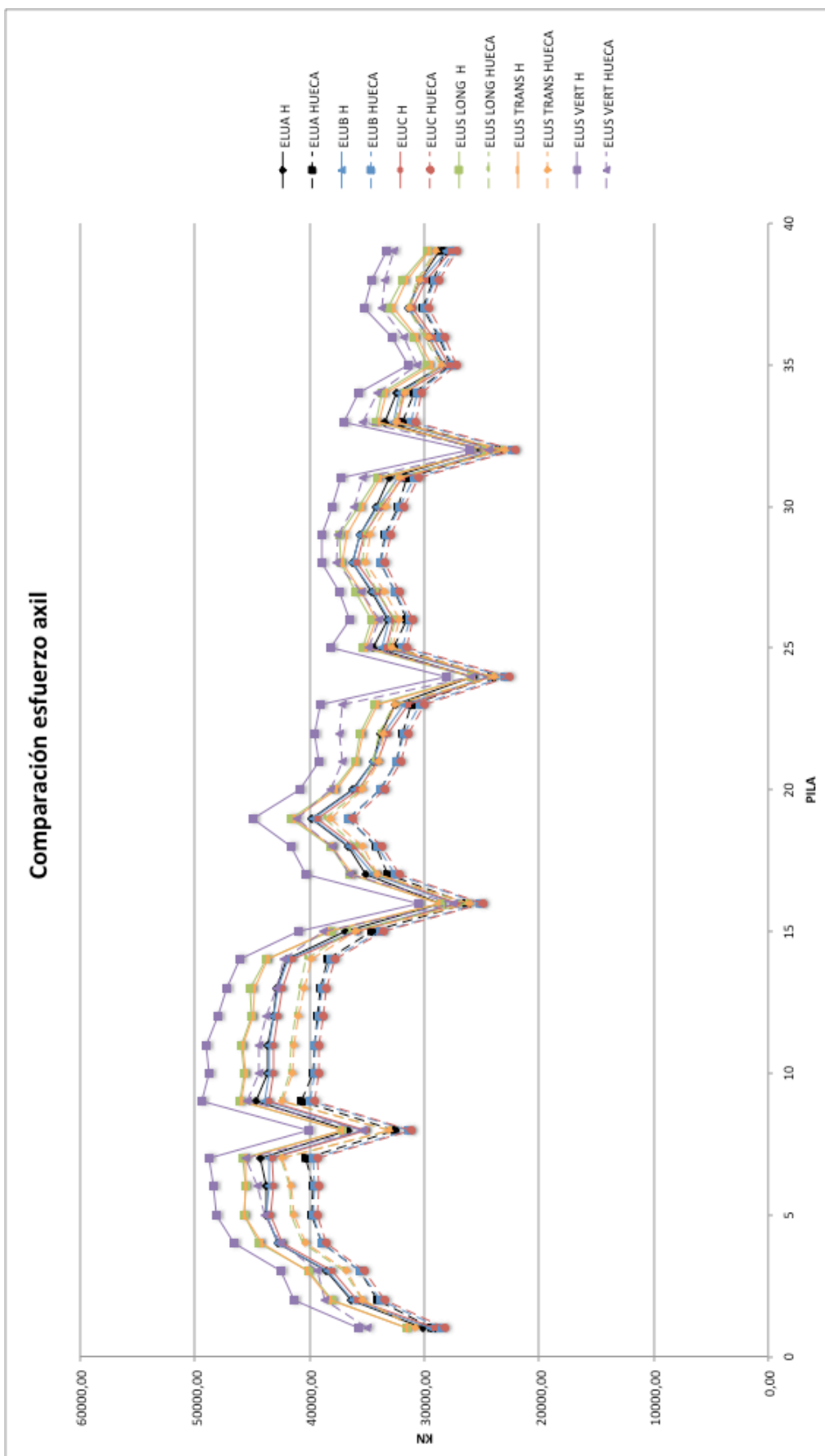


Gráfico 3. Comparación esfuerzo axil sección H vs. sección Hueca

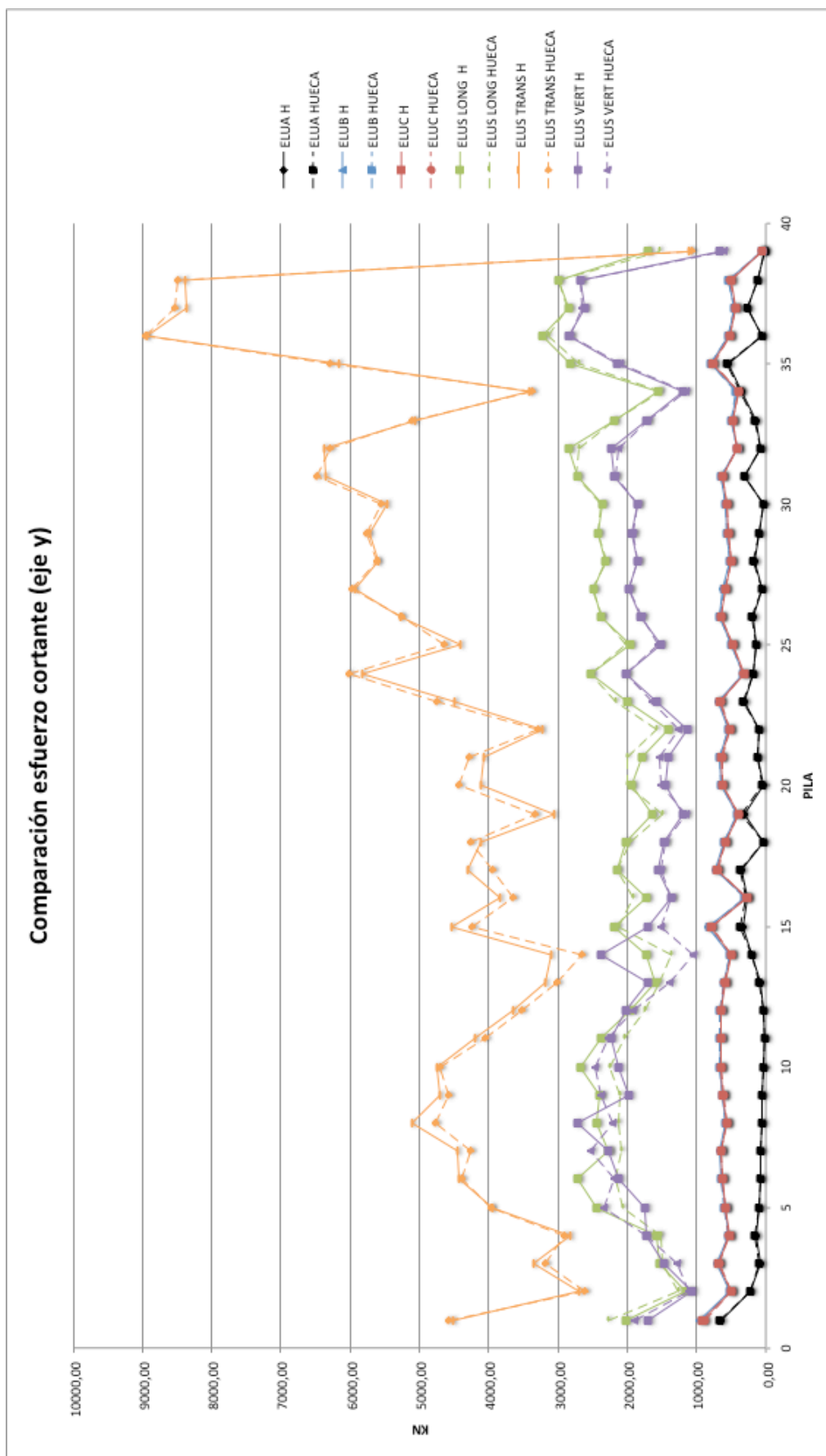


Gráfico 4. Comparación esfuerzo cortante en el eje y sección H vs. sección Hueca

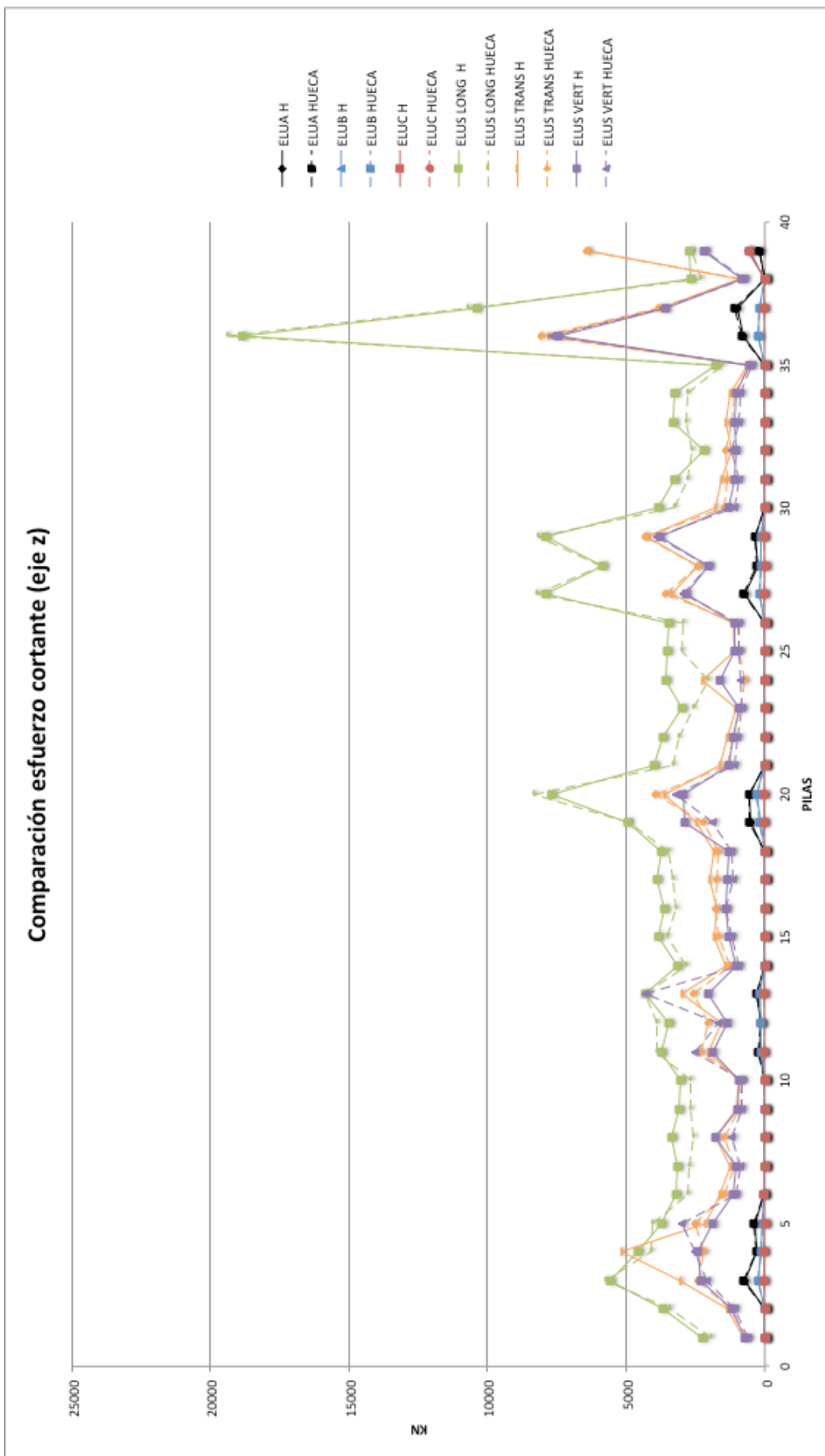


Gráfico 5. Comparación esfuerzo cortante en el eje z sección H vs. sección Hueca

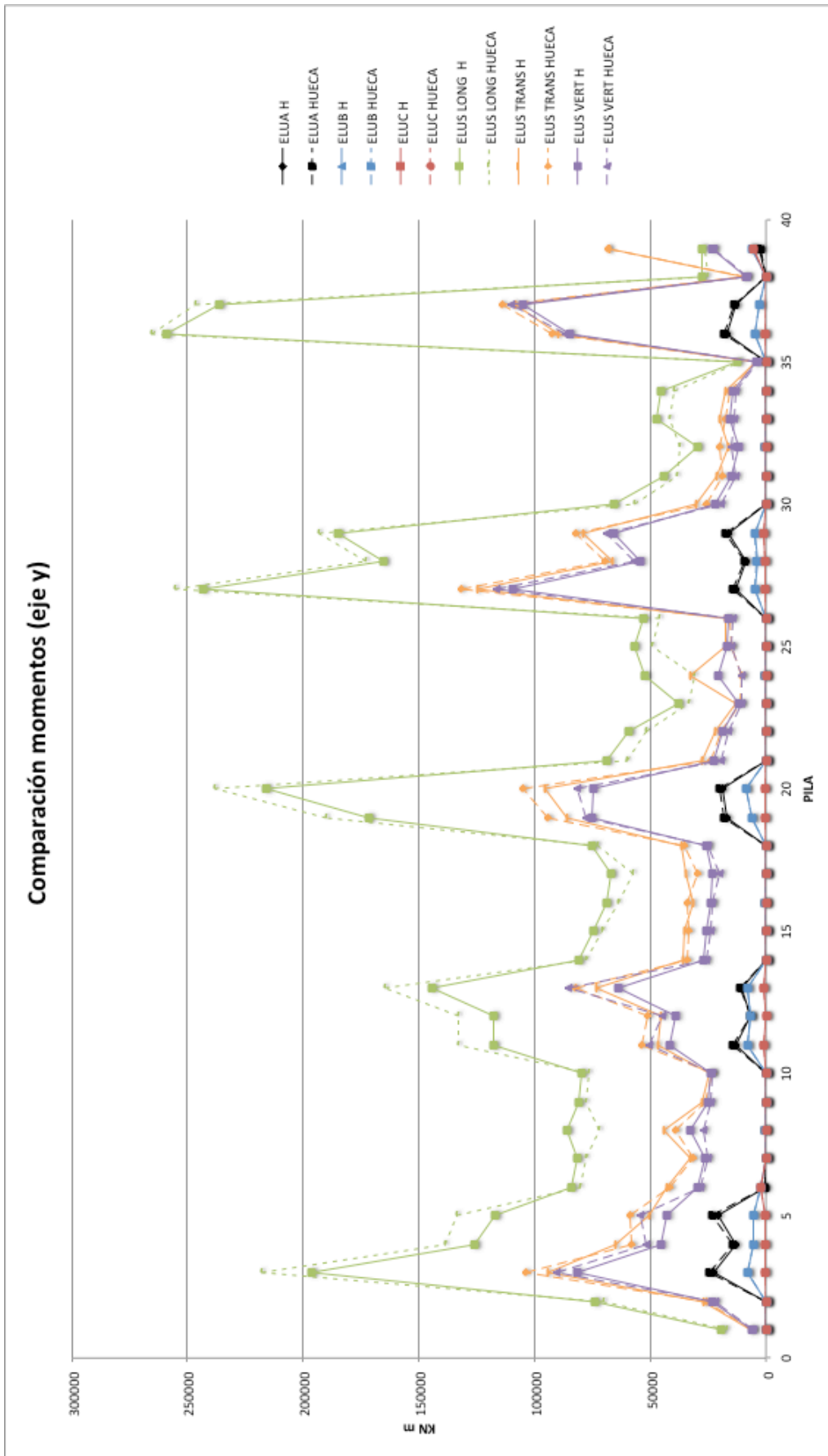


Gráfico 6. Comparación de momentos en el eje y sección H vs. sección Hueca

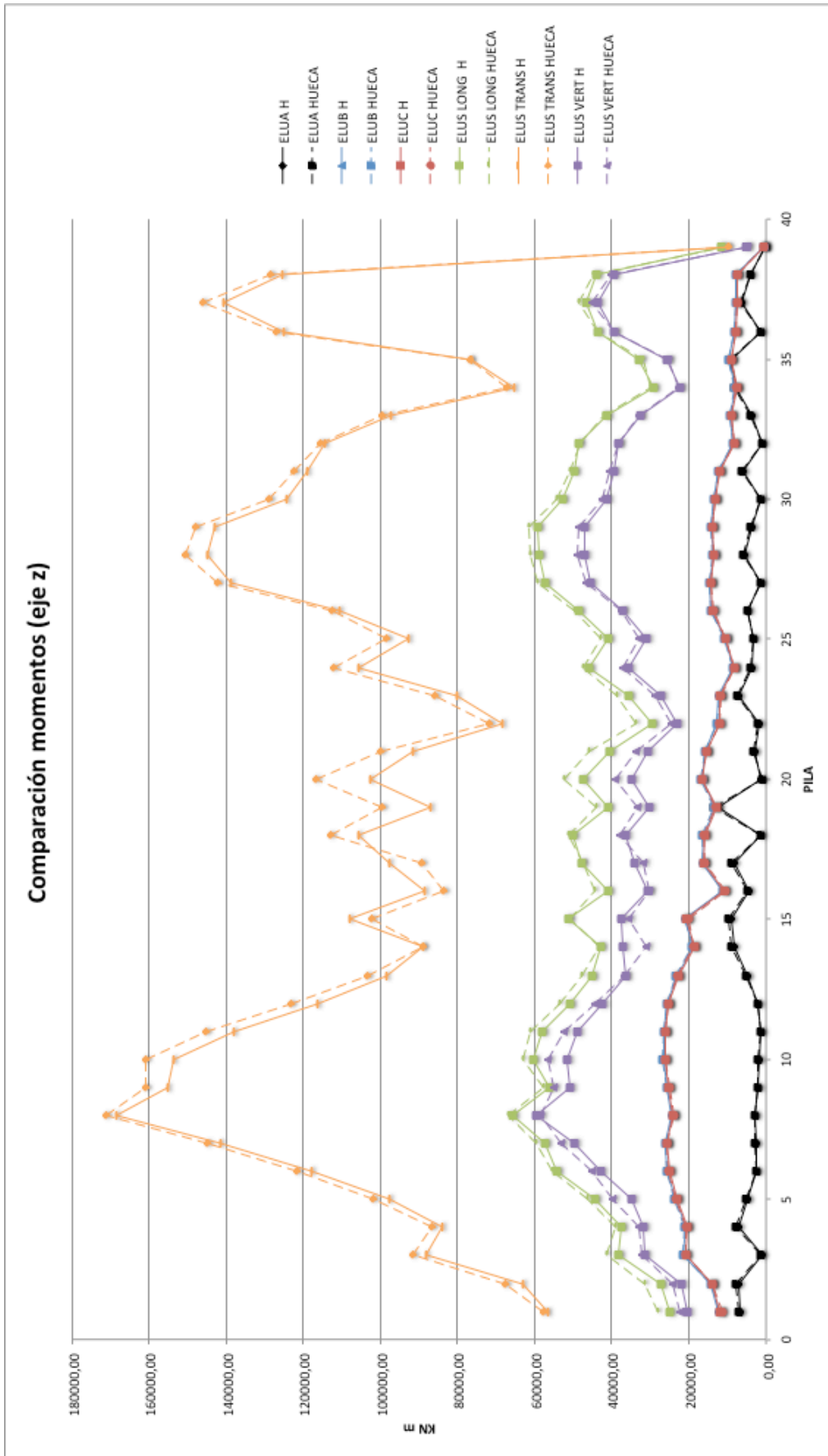


Gráfico 7. Comparación de momentos en el eje z sección H vs. sección Hueca

Finalmente se procede a realizar una comparación del análisis económico efectuado. Analizando los costes de las unidades de obra evaluadas se observa lo siguiente:

El coste de ejecución de la pila con sección hueca es superior al de la pila con sección en H considerando los mismos condicionantes de partida (ver tabla 7). Esto se debe fundamentalmente al aumento del coste de fabricación del encofrado por la presencia de hueco interno en la sección hueca, así como el aumento del personal en el equipo para poder montar y elevar este encofrado. Este aumento de costes en la unidad de obra encofrado y en el personal no compensa el ahorro de hormigón que supone en la pila hueca tener un área menor.

		H	Hueca
COSTES (€)	Encofrado	946536,02	1354948,40
	Hormigón	1372975,98	1066447,28
	Acero	816371,05	900756,95
	TOTAL (€)	3135883,05	3322152,64

Tabla 7. Comparación costes u.o. pila con sección H y pila con sección hueca

Por otro lado, el tiempo de ejecución de las pilas con sección hueca es superior a las de sección en H. La explicación de este hecho radica en que el tiempo de ejecución por fase pasa de 2 días en la H a 3 días en la hueca por la necesidad de elevar los encofrados del hueco interior, lo que supone un aumento total de tiempo de ejecución de las pilas, pasando de 97 a 145 días (ver tablas 4 y 6). Este aumento de tiempo total en la ejecución de la pila tendrá una repercusión en la ejecución del tablero, puesto que cuanto más se tarde en construir la pila, más se tarda en colocar el tablero con la autocimbra y, a su vez, este aumento de tiempo alargará el tiempo de ejecución total de la obra, lo que podría suponer, al final, una repercusión importante en los costes totales de la misma.

No obstante, los costes reflejados en la tabla 7 están calculados teniendo en cuenta los condicionantes económicos establecidos en el proyecto del viaducto 0.3B. A continuación se plantea la opción de aumentar el número de equipos para la ejecución de las pilas, es decir, se construyen 5 pilas simultáneamente en vez de 4. Esta alternativa pretende compensar el aumento de tiempo que supone la construcción de las pilas con sección hueca (de 2 a 3 días por fase) con un aumento del número de equipos que reduzca el tiempo total de ejecución de las pilas.

Long tramo (m)	5
Nº tramos (fases)	193
Tiempo ejecución/tramo (días)	3
Nº pilas	39
Long total pilas (m)	1118,94
Nº de equipos	5
Tiempo ejecución total (días)	116
Perímetro sección (m)	30,33
Área (m2)	10,07
Vc hormigón total (m3)	9981,45
Acero pasivo total (kg)	1082894,90

Tabla 8. Aumento del número de equipos a 5

Estudio de las pilas del Viaducto 0.3B, en la conexión de Mascara con la autovía Este-Oeste. T. M. de Mascara (Argelia).

Con estos nuevos condicionantes, se observa como el tiempo de ejecución total disminuye a 116 días con respecto los 145 días que se necesitaba con 4 equipos. El coste de las unidades de obra resulta:

UO 01 m2 encofrado

	unidades	horas/día	días	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	15	10	116	1160	1605	27927000
Oficial argelino	5	10	116	1160	535	3103000
Peón argelino	10	10	116	1160	321	3723600
Máquinaria						
Grúa 60 tn	5	8	59	472	7000	16520000
Grúa 100 tn	5	8	57	456	11000	25080000
Encofrado (fabricación)						41500000
Medios auxiliares (15%)						17678040,00
						135531640,00 dinar
						1266650,84 €
						Costes indirectos (7% s/ coste directo) 88665,56 €
						Coste total 1355316,40 €
						39,94 €/m2

UO 02 m3 hormigón

	unidades	horas/fase	fases	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	3	3	193	579	1605	2787885
Oficial argelino	1	3	193	579	535	309765
Peón argelino	2	3	193	579	321	371718
Máquinaria						
Bomba 45 m	1	3	193	579	15000	8685000
Grúa 100 tn	1	8	49	392	11000	4312000
Suministro hormigón					8774	87577269,45
Medios auxiliares (2,5%)						2601090,936
						106644728,4 dinar
						996679,70 €
						Costes indirectos (7% s/ coste directo) 69767,58 €
						Coste total 1066447,28
						106,84 €/m3

UO 03 kg acero

	unidades	horas/día	días	horas totales	CU	Ct (dinar)
Mano de obra						
Oficial extranjero	6	10	116	1160	1605	11170800
Peón argelino	6	10	116	1160	321	2234160
Máquinaria						
Grúa 60 tn	1	8	116	928	7000	6496000
Camión plataforma	1	8	116	928	1500	1392000
Suministro Acero					53,16	58491039,58
Medios auxiliares (7%)						5584879,97
						85368879,55 dinar
						797840,00 €
						Costes indirectos (7% s/ coste directo) 55848,80 €
						Coste total 853688,80 €
						0,79 €/kg

Lo que supone un Coste Total de ejecución de las pilas de tres millones doscientos setenta y cinco mil cuatrocientos cincuenta y dos euros (3.275.452,48 €).

En la tabla 9 se muestra una comparación de los costes de todas las alternativas.

		H (4 equipos)	Hueca (4 equipos)	Hueca (5 equipos)
COSTES	(€)			
	Encofrado	946536,02	1354948,40	1355316,40
	Hormigón	1372975,98	1066447,28	1066447,28
	Acero	816371,05	900756,95	853688,80
	TOTAL (€)	3135883,05	3322152,64	3275452,48

Tabla 9. Comparación de costes de todas las alternativas

A la vista de los resultados, aumentar a 5 los equipos para la ejecución de las pilas con sección hueca no supone un ahorro significativo de los costes, puesto que en el coste del encofrado la reducción del número de días se compensan con el aumento del personal y acaba resultando en el mismo coste. El único ahorro se aprecia en el acero, donde la disminución del número de días supone una pequeña disminución del coste.

Se observa, entonces, que la sección en H es la económicamente más competitiva, tanto por coste como por ahorro de tiempo de ejecución.

6. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados y la comparación realizada en los apartados anteriores podemos concluir lo siguiente:

Ambas pilas ofrecen un comportamiento y una respuesta muy similares. Los resultados de los esfuerzos en ambas secciones coinciden en la mayoría de las combinaciones, lo cual corrobora que la elección de las mismas características mecánicas para ambas secciones, sobretodo en términos de inercia, conducirán a resultados homólogos.

Con los condicionantes económicos de partida que presentaba la sección H, los costes obtenidos muestran que ésta resulta económicamente más ventajosa que la hueca, aunque la diferencia no es demasiado grande. Además, el tiempo de ejecución de las pilas se reduce considerablemente (de 145 días a 97), lo que adelanta, en general, el tiempo de ejecución de la obra completa y puede suponer un ahorro de costes en el conjunto del proyecto. Incluso modificando esas condiciones de partida y añadiendo 1 equipo más en la construcción de las pilas con sección hueca, el coste no se reduce significativamente, puesto que el ahorro de días queda compensado con el aumento del coste del personal necesario.

En base a esto, la sección elegida para la ejecución del viaducto 0.3B responde, por un lado, a la necesidad de reducir el tiempo de ejecución de las pilas, el cual representa el camino crítico de la obra y condiciona la ejecución del tablero, tal y como requería el proyecto sin que ello afecte al coste general del mismo. Por el otro, no ofrece un comportamiento muy diferente del que habría ofrecido una pila con sección más común como es la sección hueca. Con esta información, se puede concluir que la sección por la que se optó para la construcción del viaducto 0.3B resulta una buena solución a la problemática que presentaba el proyecto.