

Viaducto sobre el torrente Polcevera, en Génova, de la autopista Savona-Génova: Vista general.

viaducto **sobre el Polcevera, en Génova - Italia**

Prof. Ing. RICCARDO MORANDI

sinopsis

Recientemente ha sido terminado y puesto en servicio el viaducto sobre el Polcevera, en Génova, para la autopista Savona-Génova, algunas de cuyas particulares condiciones de adaptación han obligado a resolver una serie de problemas que se indican en el artículo.

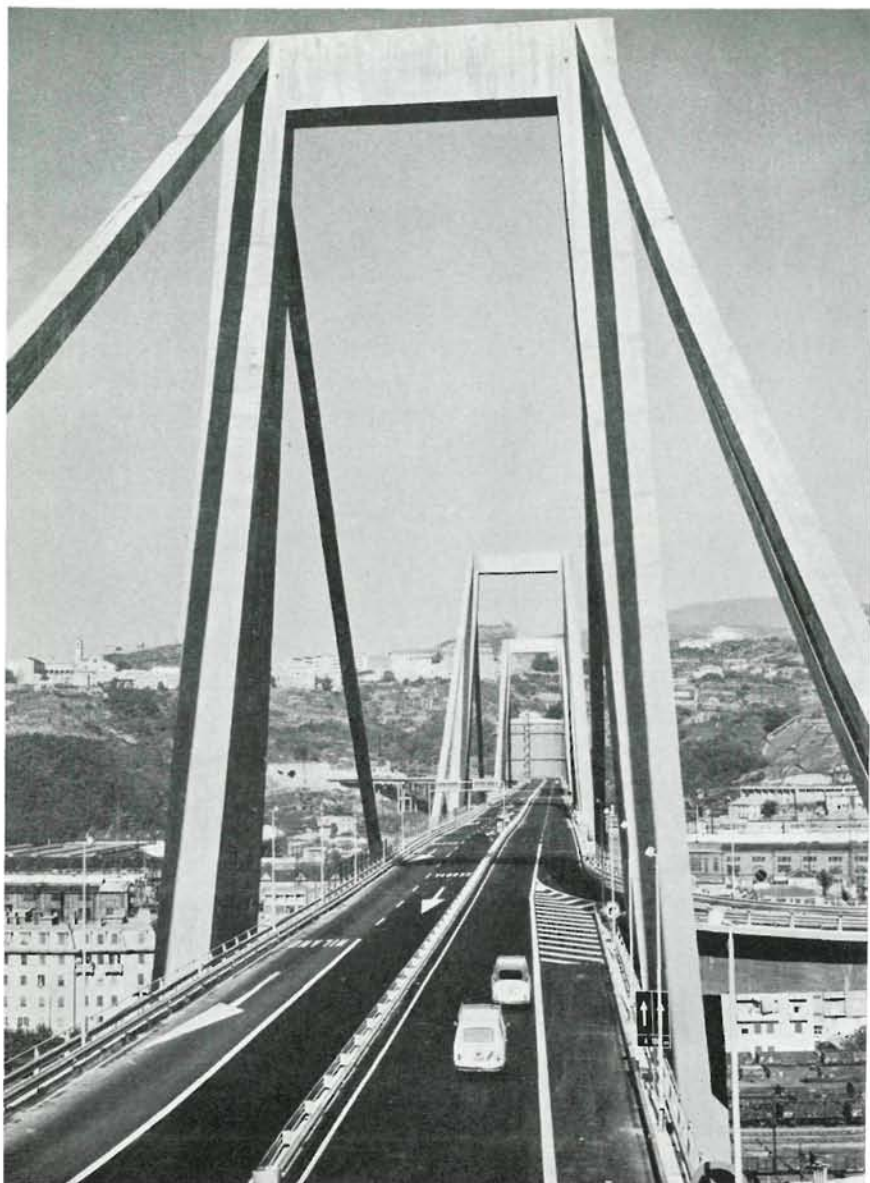
Se trata de una construcción de dimensiones notables que, junto con algunas otras de importancia parecida, ya ejecutadas o bien en construcción, contribuye a demostrar la posibilidad de realizar obras de luces cada vez mayores, sin más que seguir admitiendo la técnica y la tecnología del hormigón armado y pretensado, debidamente aplicadas.

Introducción

El tramo final hacia el sur de la autopista Savona-Génova, la primera en acoplarse a la autopista Génova-Valle del Po, después de cruzar bajo la colina de Coronata por medio de un túnel, pasa sobre el Valle de Polcevera y en seguida se distribuye en el sistema de inserción entre las dos autopistas.

El paso del Valle de Polcevera y el sistema de inserción se han resuelto por medio de una gran obra de arte, de concepción única y de notables dimensiones e interés técnico, que se expondrá a continuación.

562-108



Viaducto sobre el Polcevera: Vista superior.

El paso del valle y el sistema de las rampas de empalme atraviesan una zona con gran profusión de edificios civiles e industriales, afectada además por el río Polcevera, debiendo añadirse una serie de instalaciones ferroviarias de gran importancia que, por exigencias ineludibles, han impuesto las premisas del proyecto, la ampliación de las luces y los métodos de ejecución.

La obra, por tanto, puede considerarse en su conjunto como un ejemplo interesante de inserción de una gran estructura en un espeso entramado urbano e industrial, y también de inteligencia al crear una composición correcta desde el punto de vista formal y paisajístico.

Primera parte

Descripción general de la obra

El conjunto de la obra puede subdividirse en las siguientes partes:

- a) viaducto principal;
- b) pista de empalme de Serravalle a Savona;

- c) pista de empalme de Savona a Serravalle;
- d) pista de empalme de Savona a Génova;
- e) pista de empalme de Génova a Savona.

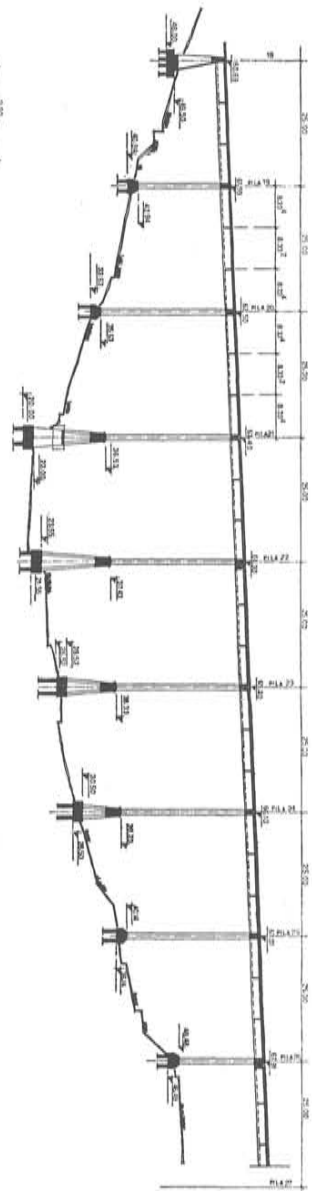
a) Viaducto principal.

El viaducto consta de las luces teóricas siguientes (a partir del estribo situado del lado de Savona):

una luz de 43 m;	una luz de 207,884 m;
cinco luces de 73,20 m;	una luz de 202,50 m;
una luz de 75,313 m;	una luz de 65,10 metros.
una luz de 142,655 m;	

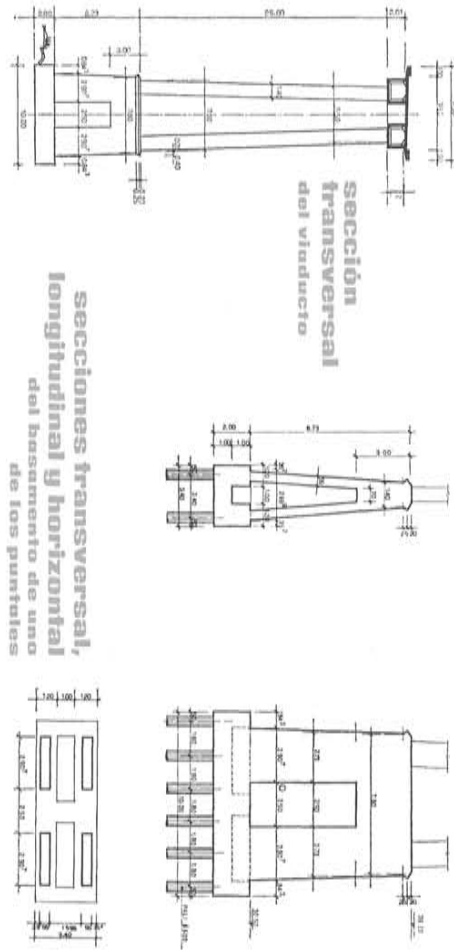
Las luces, de esta amplitud tan desigual, hallan el vínculo de unificación de su concepción en una serie de estructuras iguales de hormigón pretensado, de 36 m de luz, sujetadas por simple apoyo sobre una serie de sistemas especiales, entre los cuales podemos distinguir dos tipos fundamentales diferentes:

- *El sistema en caballete para las luces menores:* Está formado por dos pies inclinados unidos por su cabeza por medio de una armadura en doble voladizo de longitud variable. El conjunto de hormigón armado está unido al pie a una zapata apoyada, a su vez, sobre una empalizada de pilotes, de 110 cm de diámetro y longitud variable hasta 48 metros.

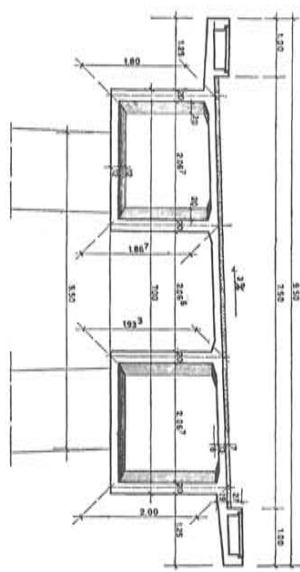


sección
según el eje longitudinal del viaducto

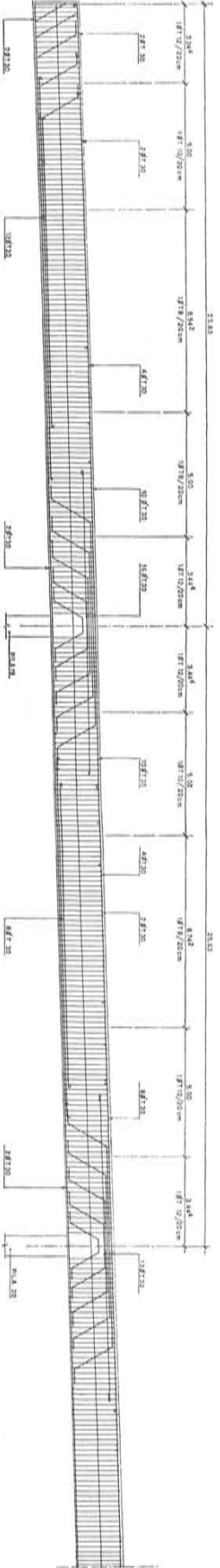
sección
transversal
del viaducto



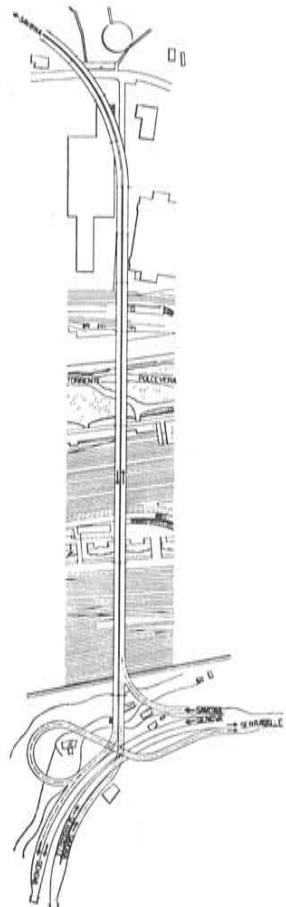
sección transversal
del tablero



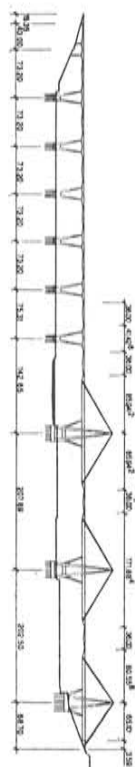
secciones transversal,
longitudinal y horizontal
del basamento de uno
de los puentes



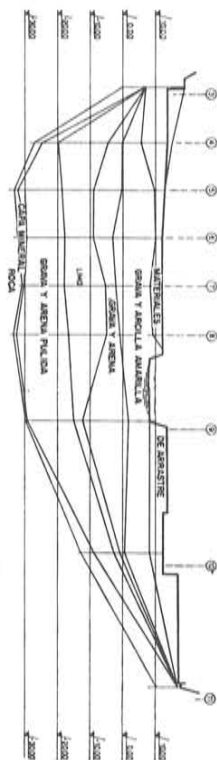
sección longitudinal
del entramado en curva: ornadura



planta
del viaducto principal y de las pistas de empalme



aspecto
del viaducto principal



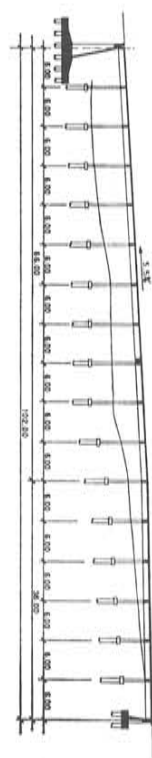
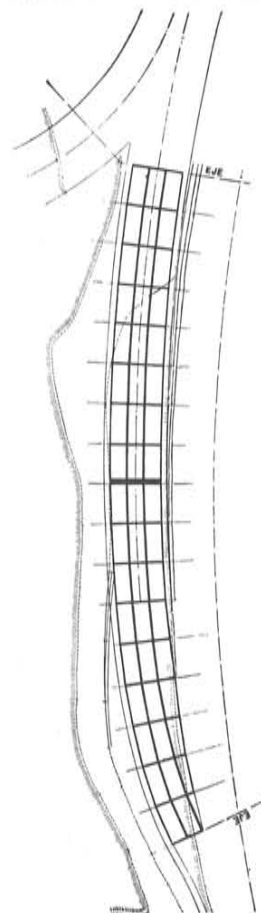
estudio
del corte geológico del terreno de sustentación

— El sistema compensado para las luces mayores. Dicho sistema está formado por una estructura compuesta de tres luces sobre cuatro apoyos con dos salios terminales sobre cuya extremidad están apoyadas las vigas de 36 metros.

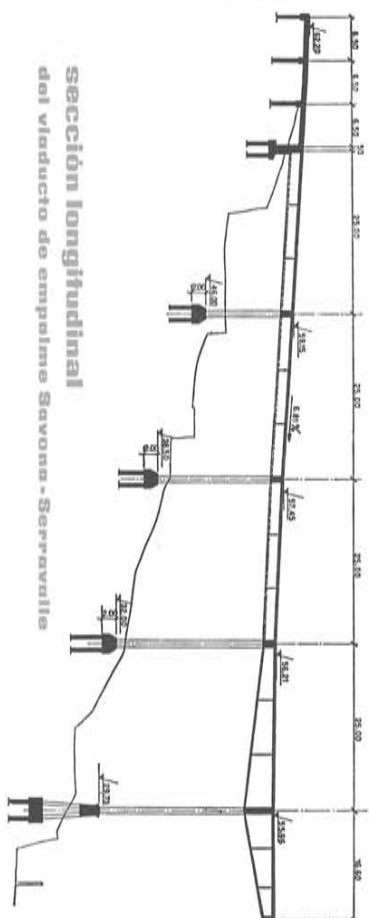
Los dos apoyos más externos de los cuatro vínculos de la estructura están formados en sus extremos por dos tirantes de acero pretensado que pasan encima de una antena, dispuesta en correspondencia con el eje del sistema, de 90 m de altura desde el suelo y de unos 45 m sobre el plano de circulación del puente.

Cada sistema compensado está formado por:

- 1) una zapata de cimentación nervada, de hormigón armado, apoyada sobre una empalizada de pilotes de 150 cm de diámetro.



planta y sección longitudinal
del viaducto del empalme Savona - Génova



sección longitudinal
del viaducto de empalme Savona - Serravalle

- 2) un caballete especial, de hormigón armado, formado por cuatro elementos artrostrados en H y unidos entre sí por travasos. Los extremos superiores del caballete constituyen apoyos elásticos para la armadura del tablero.

- 3) una «antena» de cuatro elementos inclinados convenientemente, unidos entre sí en ambos sentidos (longitudinal y transversalmente debe formarse un armazón auténtico y particular), pero de manera que mantengan la antena independiente del sistema caballete-armazón.



Empalme Savona-Serravalle.

- 4) una estructura continua, de hormigón pretensado, de tipo celular, con una placa en el extradós, otra en el intradós y seis nervaduras, que se apoyan sobre el cabellete al que nos referimos en 2).

En correspondencia con el nudo de enlace de los tirantes de suspensión la estructura presenta un robusto travesaño, también de hormigón pretensado, en cuyo extremo, a ambos lados del puente, quedan asegurados dos haces de cables que forman los tirantes y sujetan la antena a 90 m del suelo.

Alrededor de los cables están colocados sucesivamente los revestimientos de hormigón, cuya misión queda señalada a continuación:

b) *Pista de empalme de Serravalle a Savona.*

Esta pista consta de:

- un tramo realzado de casi 100 m de longitud;
- cuatro luces de 25 m;
- un voladizo de 16,60 m de vuelo.

El tablero está formado por una estructura continua, de hormigón armado, con una sección transversal compuesta por dos vigas en cajón, protegidas y unidas por un sistema de travesaños rígidos y con una placa extradosal de espesor constante e igual a 13 centímetros.

El tablero se apoya sobre pilas compuestas de dos pies derechos arriostrados de dimensiones $0,8 \times 1,4$ metros.

c) *Pista de empalme de Savona a Serravalle.*

Esta pista consta de:

- un tramo realzado de cerca de 200 m de longitud;
- nueve luces de 25 m;
- una luz de 17 m;
- una luz de 32,50 m;
- una luz de 28 m;
- un vuelo de 5,75 metros.

El tramo de viaducto comprendido entre el estribo número 18 y la pila número 25 está dispuesto ininterrumpidamente según una curva circular de 45 m de radio. Tal curva, de desarrollo helicoidal, permite a la pista sobrepasar la Savona-Génova y Génova-Savona, pero no la Milán-Génova y Génova-Milán. Tales elevaciones se realizan en correspondencia con las luces de 17 y 32,50 m, entre las pilas números 27, 28 y 29.

Vista superior del empalme Savona-Serravalle.



Construcción de la pila número 3.

El tablero está formado por una estructura continua, de hormigón armado, con sección transversal compuesta por dos vigas en cajón, protegidas y unidas por un sistema de travesaños rígidos y con una placa extradossal de espesor constante e igual a 13 centímetros.

El tablero se apoya sobre pilas, compuestas de dos pies derechos arriostrados de $0,8 \times 1,4$ metros.

d) *Pista de empalme de Savona a Génova.*

Esta pista consta de:

- una sobreelevación de casi 200 metros de longitud;
- diecisiete luces de 8 metros;
- una sobreelevación de casi 180 m de largo.

El tablero está formado por una placa nervada continua, de hormigón armado, tramada entre bastidores transversales sustentadores.

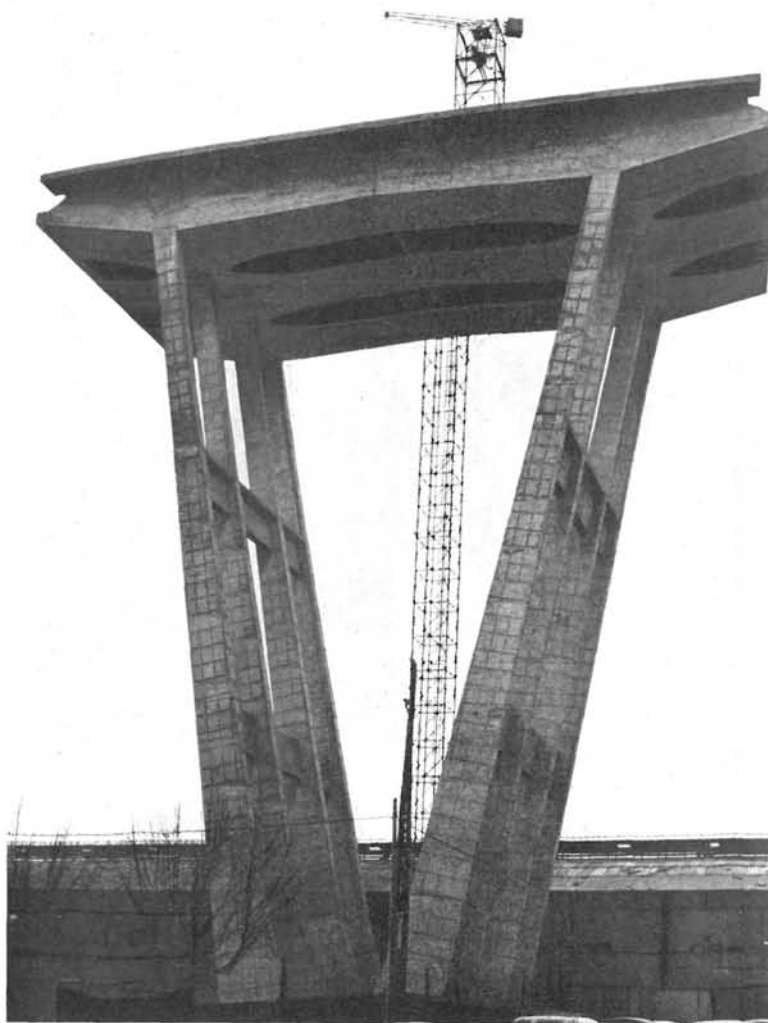
e) *Pista de empalme de Génova a Savona.*

Esta pista, totalmente apoyada sobre el terreno, sale a la derecha de la actual autopista Génova-Valle del Po, la flanquea durante un trecho perdiendo cota y, al fin, pasa por debajo de ella para embocar directamente al gran viaducto.

Por tanto, se saca en conclusión que el sistema de inserción entre las dos autopistas está caracterizado por el paso sobre tres niveles diferentes y, por efecto de la especial morfología de los terrenos, se desarrolla casi por completo sobre estructuras colgantes, proyectadas con intención estilísticamente unitaria con el viaducto propiamente dicho.

Sistema de inserción y viaducto forman así un conjunto único fuerte y originalmente expresivo.

Viaducto: Pila número 3.





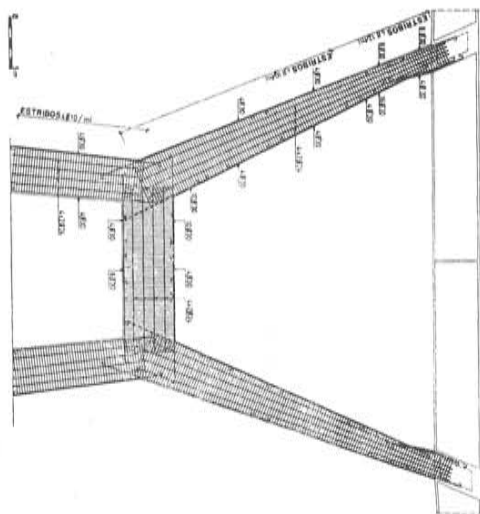
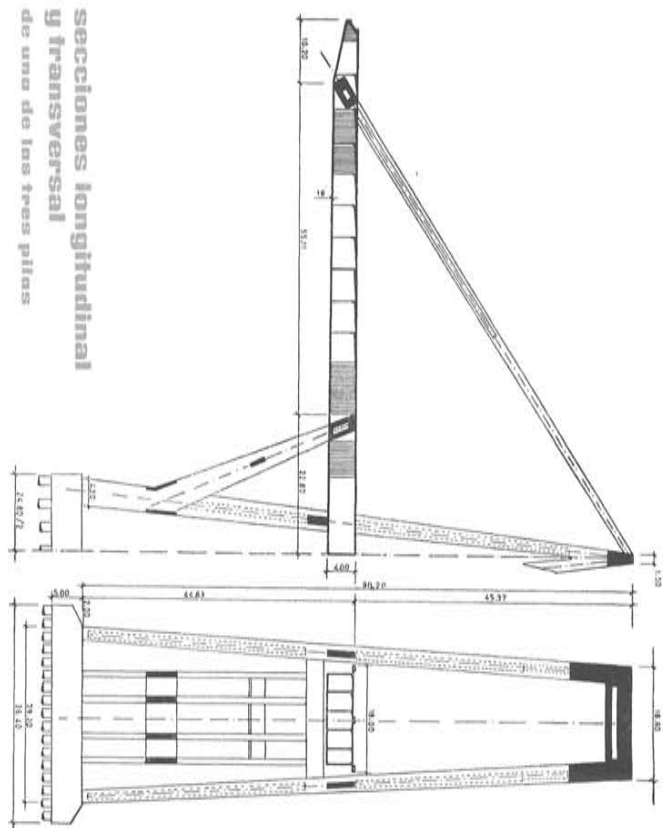
Lanzamiento de las vigas entre las pilas números 7 y 8.

Desde el punto de vista funcional a continuación resumimos las características del organismo de comunicación:

La cinta de la carretera, a lo largo de todo el viaducto, discurre horizontalmente a una altura media de 44 m sobre el sistema urbano de carreteras y de 40 m sobre el sistema de ferrocarriles, mientras las pistas que deben realizar el empalme plano-altimétrico entre las dos autopistas presentan pendientes variables.



Lanzamiento de las vigas entre las pilas números 2 y 3.



sección longitudinal
con armadura de uno de los caballetes

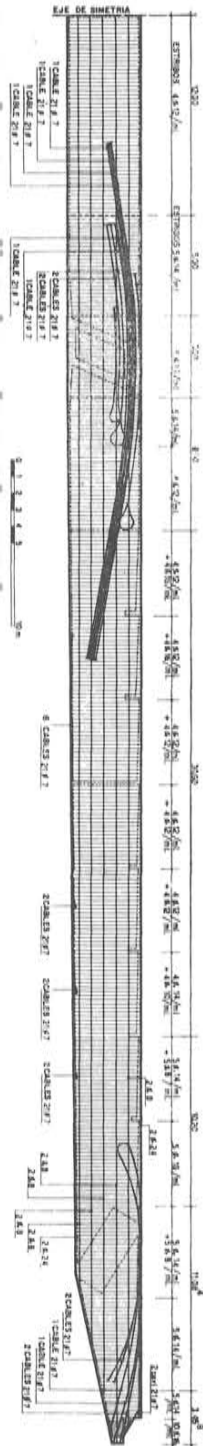
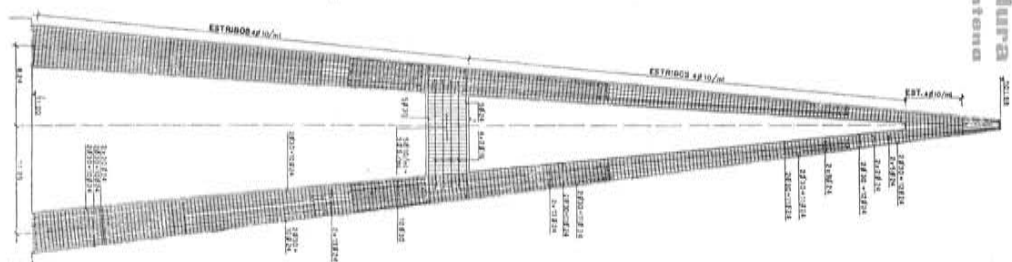
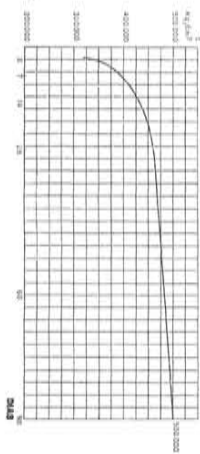
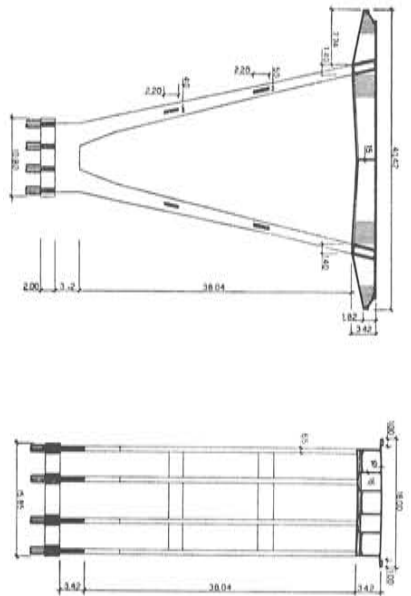


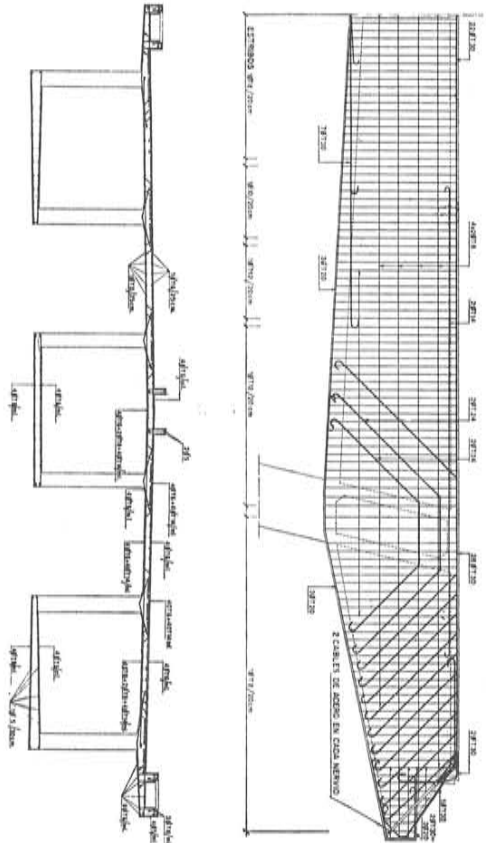
diagrama del módulo
elástico medio del hormigón





secciones longitudinal y transversal de las pilas

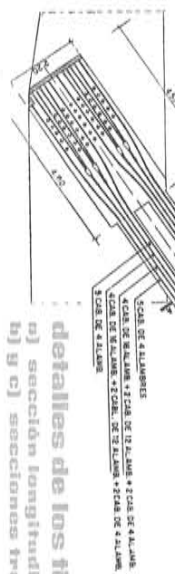
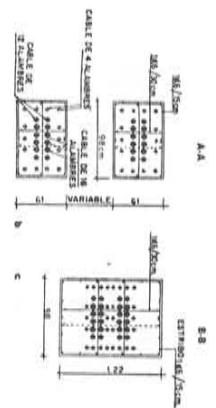
secciones longitudinal y transversal de la viga en voladizo: armadura



Las anchuras de las carreteras son las siguientes:

1) Para el viaducto principal:

Anchura total (1 m + 7.50 m + 1 m + 7.50 m + 1 m) = 18 m.

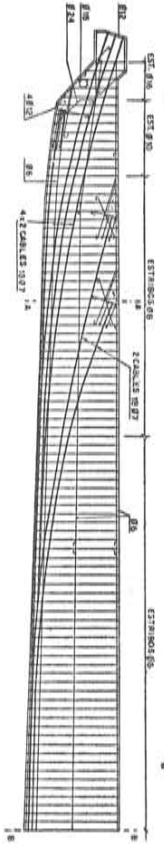


detalles de los tirantes:

a) sección longitudinal
b) y c) secciones transversales

una de las vigas prefabricadas y prensadas, de 36 m de luz:

a) sección longitudinal
b) secciones transversales



2) Para los empalmes unidireccionales:

Anchura total (1 m + 7.50 m + 1 m) = 9.50 m.

Todo el complejo, viaducto y pistas de empalme, alcanzan una superficie total de cerca de 24.850 metros cuadrados en planta.



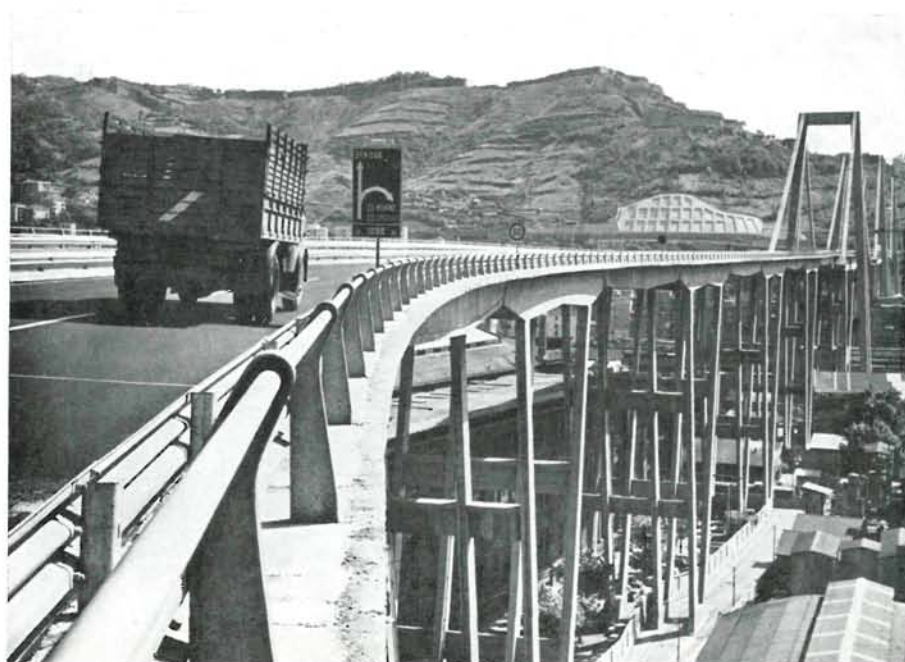
Lanzamiento de las vigas entre las pilas números 6 y 7.

Parte segunda

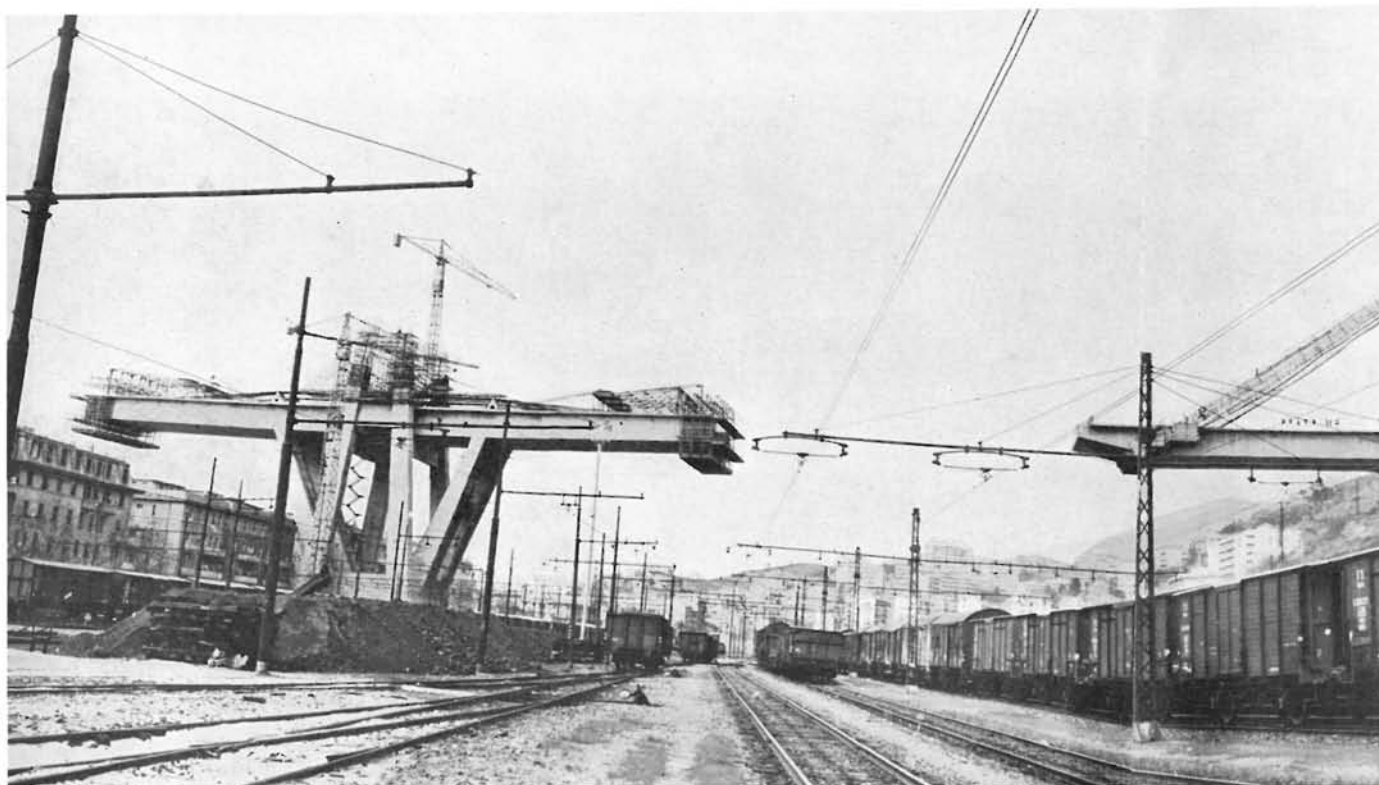
Características del proyecto

a) Cimientos.

El Valle de Polcevera, en el tramo afectado por la obra que nos ocupa, se caracteriza por una geomorfología más bien típica de los valles ligures, es decir, un plegamiento del estrato geológico de los esquistos, anfíboles y filadíos, todos ellos fuertemente degrada-



Vista del extremo norte.

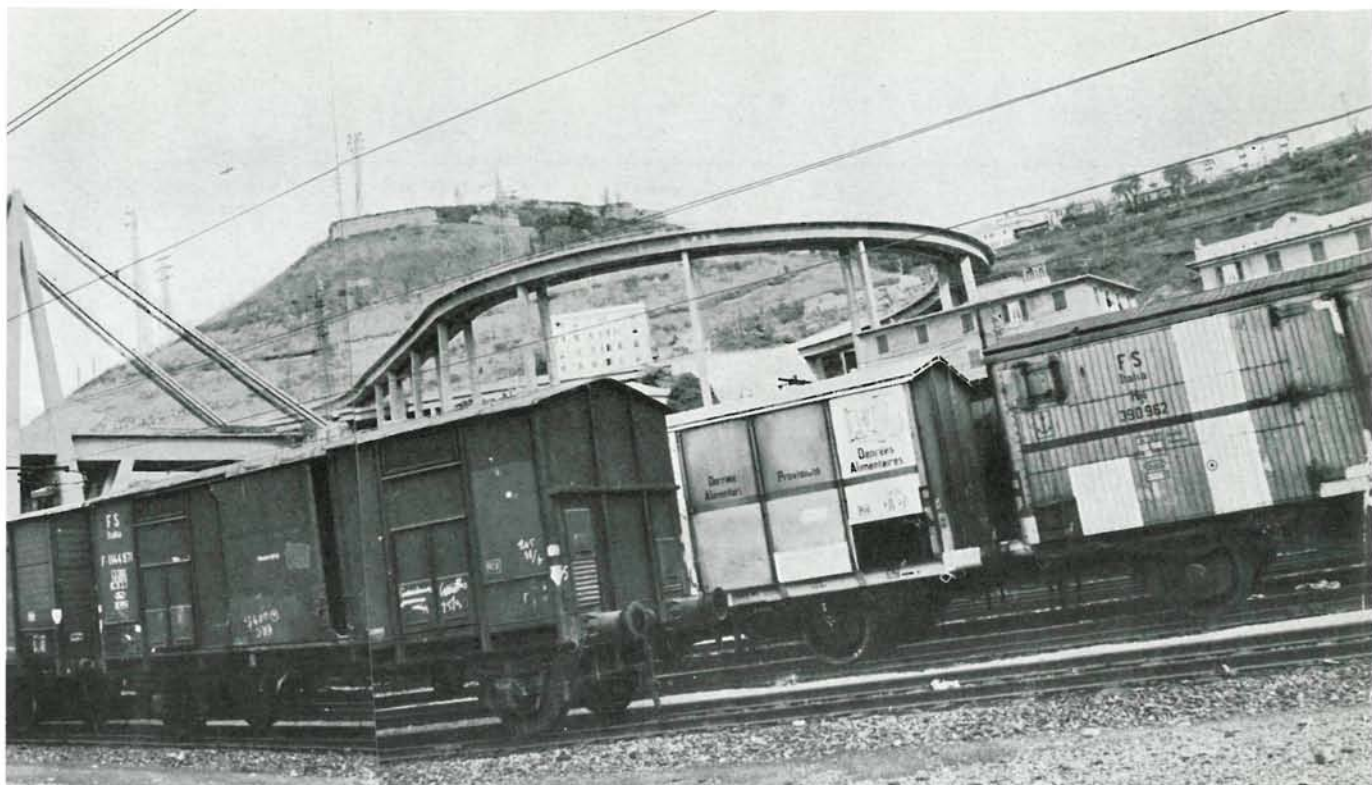


Vista parcial de la obra desde la vía férrea.

dos en sus estratos superficiales (por consiguiente, en condiciones de equilibrio precarias), con un fuerte corte en el fondo del valle, de origen hidromecánico, relleno por una espesa capa de aluviones formados por limos, arenas y gravas, con inclusiones de arcilla plástica y formaciones de turba.



El sistema número 10 visto desde la calle Fillak.



Por tanto, todos los elementos de cimentación de la obra han debido alcanzar una relativa profundidad para encontrar apoyo sobre estratos rocosos estables cuando éstos afloran en correspondencia con la orilla del valle, o sea, estratos rígidos y consolidados de los aluviones del fondo del valle.

En la tabla que se incluye a continuación se indican las características principales de los cimientos, realizados casi todos mediante empalizadas de hormigón armado, del tipo convencional «taladrado», de diversos diámetros:



El sistema número 11 con los tirantes desnudos.

Pila o estribo	Ø (mm)	Número de los pilotes	Profundidad media (m)	Total de metros por pila
Estribo núm. 1	600	30	22,00	660,00
Pila núm. 2	1.000	16	23,00	368,00
Pila núm. 3	1.200	16	24,00	384,00
Pila núm. 4	1.100	16	44,00	704,00
Pila núm. 5	1.100	16	48,00	768,00
Pila núm. 6	1.100	16	46,00	736,00
Pila núm. 7	1.100	16	43,00	688,00
Pila núm. 8	1.100	16	47,00	752,00
Pila núm. 9	1.500	62	43,00	2.666,00
Pila núm. 10	1.500	60	30,00	1.800,00
Pila núm. 11	1.500	50	25,00	1.250,00
Estribo núm. 12	1.100 (inclinado)	32	26,00	832,00

Las resistencias unitarias máximas adoptadas en la práctica son las siguientes:

Ø de los pilotes (mm)	Resistencia (t)
600	80
1.000	170
1.100	220
1.500	550

Sobre la cabecera de cada empalizada de fondo ha sido construida una estructura de hormigón armado, la cual se ha concebido obedeciendo al criterio de adoptar una gran rigidez para garantizar una óptima distribución de cargas sobre varios pilotes, prácticamente no influenciada por las deformaciones de la misma estructura.



La estructura del empalme Savona-Serravalle.

Como ya se ha dicho, el empalme Savona-Serravalle está formado por un largo viaducto, de hormigón armado, cuya característica consiste esencialmente en el tramo helicoidal entre las pilas números 19 y 25.

Este tramo consta de una armazón continua de siete luces y eje circular de 45 m de radio (al centro de la carretera) y sustentada por elementos verticales de notable elevación (hasta 39 m).

El soporte vertical tipo, que consta de dos pies derechos de $1,40 \times 0,80$ m, resulta sometido (en cuanto a seguridad de la inestabilidad elástica) a las acciones casi-flectantes transmitidas por el tablero superior y el viento.

Respecto a la exigencia según la cual debe mantenerse un margen de seguridad para la inestabilidad elástica, la altura crítica compatible con las dimensiones de la estructura ha sido disminuida a 25 metros.

Cuando la morfología del terreno ha obligado a adoptar alturas mayores (el empalme está situado en una zona muy escarpada y accidentada), éstas se han obtenido mediante un tramo básico formado por una malla especial de gran rigidez y de fabricación especial.

El tablero está constituido por dos vigas-cajón, una junto a otra y unidas por un sistema de travesaños rígidos y puestos a poca distancia entre sí (8,75 m).

Las vigas, con una sección constante de $2,467 \times 1,83/1,96$ m, se hallan unidas entre sí por una placa, de 13 cm de espesor constante, colocada en el extradós.

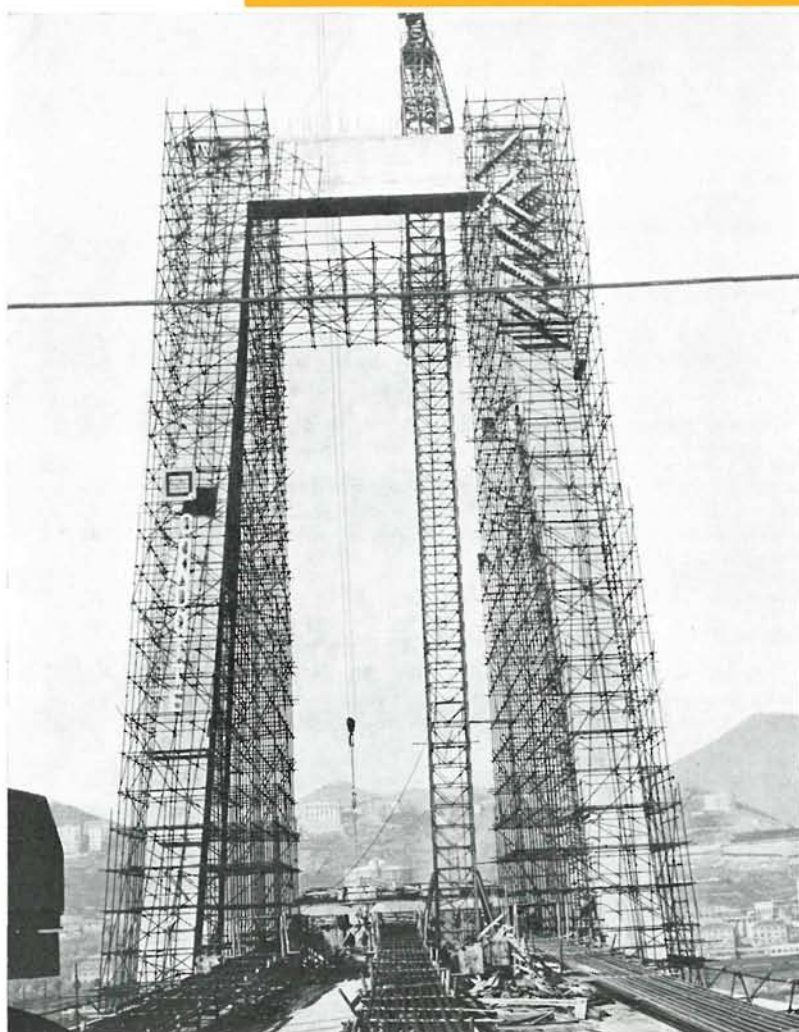
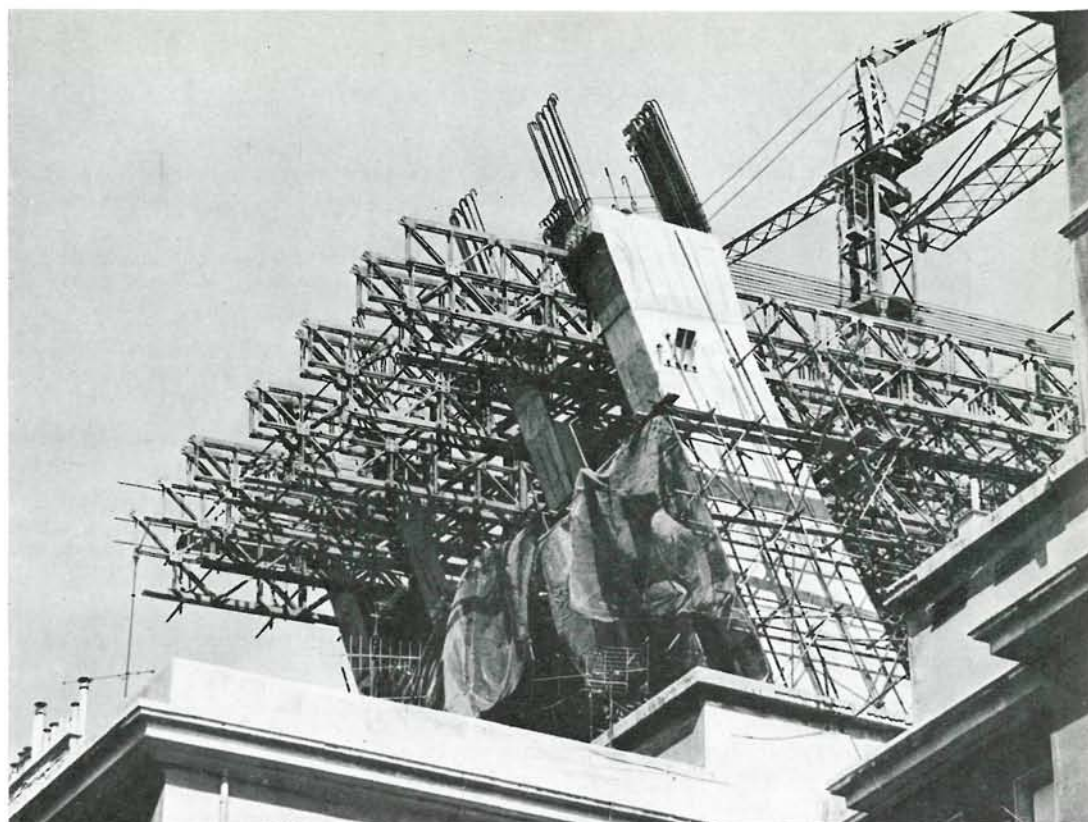
Obviamente, una disposición semejante está adoptada con el objeto de obtener una fuerte resistencia torsor-flexional dentro de las disposiciones más racionales posibles del hormigón empleado, que no supera la cantidad de $0,60 \text{ m}^3$ por cada m^2 de tablero de la carretera.



La estructura del empalme Savona-Génova y Génova-Savona.

La realización de este empalme ha supuesto el uso de estructuras corrientes de poca importancia que no procede describir.

Estructura provisional para la construcción del tablero entre los puntales oblicuos del sistema número 10.



d La estructura del empalme Serravalle-Savona

Como ya se ha dicho, el empalme Serravalle-Savona consta de un viaducto de cuatro luces, cada una de 25 m, y de un voladizo que se extiende desde la pila número 13 hasta apoyarse, para conseguir la continuidad del paso, en el viaducto principal entre las pilas números 10 y 11.

La disposición de las distintas partes de la estructura de este empalme es muy similar a la del Savona-Serravalle.

e La estructura del tramo del viaducto principal entre los apoyos 1 a 8 (luces pequeñas).

El tramo del viaducto principal comprendido entre las pilas números 1 a 8 se caracteriza, sobre todo, por la especial disposición en V de los elementos de apoyo

Construcción de las antenas.

75

del tablero, que ha hecho posible su inserción en el denso entramado urbano, a pesar de que las luces del tablero resultaron demasiado caras, dada la imposibilidad de multiplicar el número de puntos de apoyo sobre el terreno.

En otros términos, cada pilar inclinado de las distintas pilas representa el elemento de unión entre una posición de apoyo conveniente para la estructura del tablero y una posición de apoyo en tierra cuya colocación es realizable, dada la situación urbana existente.

El sistema estático general resulta, por tanto, formado por dos pies inclinados convergentes hacia tierra sobre el elemento de cimentación y unidos en su parte superior por una viga que se extiende en voladizo por dos tiros laterales de 7,125 m, adyacentes a la luz central, de 22,95 metros.

Como ya se ha indicado, los extremos de cada parte en voladizo constituyen apoyos de vigas simplemente apoyadas de 36 m de luz.

Los pies inclinados están formados a su vez por cuatro pilares de sección variable, con medidas mínimas en su parte superior de 140×65 cm y máximas en la inferior de 300×65 cm, unidas entre sí, además de por su extremo, por otros dos puntos intermedios. El tablero consta de seis nervios de sección variable, unidos a la placa superior y al sistema de travesaños.

Es interesante advertir que el dispositivo formado por el conjunto de los elementos inclinados y horizontales se encuentra sometido a desplazamientos horizontales producidos por los movimientos parciales y disimétricos de las sobrecargas móviles accidentales.

Tales desplazamientos han sido reducidos parcialmente por medio de una oportuna calibración de las aberturas de las juntas de dilatación, sin haberse podido conseguir eliminarlos por completo, dada la necesidad de mantener un mínimo de la amplitud de los grados de libertad necesarios para las variaciones térmicas del tablero.

Las acciones producidas por las limitaciones del desplazamiento de todo el tramo en observación del viaducto son soportadas fácilmente, sea por el estribo número 1, suficientemente resistente, sea por la pila número 9.

A diferencia de todas las demás estructuras, que, como ya se ha dicho, han sido efectuadas en hormigón armado, las vigas simplemente apoyadas que unen los diversos sistemas paratriangulares son de hormigón pretensado, totalmente prefabricadas.

Asimismo, son prefabricadas y después lanzadas (por medio de un carro-puente especial concebido para este caso por el director a pie de obra) todas las distintas mallas, e igualmente también son prefabricadas las losas del tablero, de dimensiones de $1,45 \times 2,90$ m. Los detalles de la unión de los distintos elementos se acompañan en las diversas figuras y han sido objeto de especial estudio.

Estructura del tramo de viaducto entre las pilas 8 y 11 (luces grandes).

El tramo de mayores luces del viaducto se halla situado precisamente entre la pila número 8 y el estribo número 12, y está constituido por tres sistemas especiales compensados, de los que los sistemas números 9 y 10 son idénticos entre sí.

Pasamos a examinar, por ejemplo, el sistema número 9, que constituye una unidad estructural continua en sí misma, fija y unida al resto de la obra por elementos simplemente apoyados sobre él.

Como más arriba se ha descrito ya sumariamente, el sistema compensado consta de una armazón continua de tres luces con saltos terminales, de una longitud total de 171,884 m, con sección celular de cinco compartimientos, con una placa en el extradós de 16 cm de espesor, seis nervaduras de espesor variable entre 18 y 30 cm y una placa en el intradós de 16 cm de espesor.

La altura del entramado es variable, con un máximo de 4,50 m y un mínimo de 1,82 metros.

Dicha estructura continua está vinculada al resto por cuatro puntos:

- dos, centrales, colocados a una distancia de 41,64 m entre sí, sobre dos pilares inclinados, cada uno compuesto por cuatro elementos verticales de sección variable entre un mínimo de 200×120 cm y un máximo de 450×120 cm y encajados por su base sobre unos bloques de cimentación;
- dos, laterales, situados a una distancia entre sí de 151,872 m y con un doble sistema de tirantes que pasan sobre un caballete, llamado antena, el cual, separándose también del bloque de cimentación, resulta independiente del entramado, salvo, bien entendido, el enlace efectuado con el sistema de tirantes.

La antena está constituida por dos estructuras en A unidas entre sí a media altura y en el extremo (no sólo del bloque de cimentación), de la altura de 90,20 m, con elementos estructurales de hormigón armado y sección variable de $4,50 \times 0,90$ m a $2 \times 2,956$ metros.



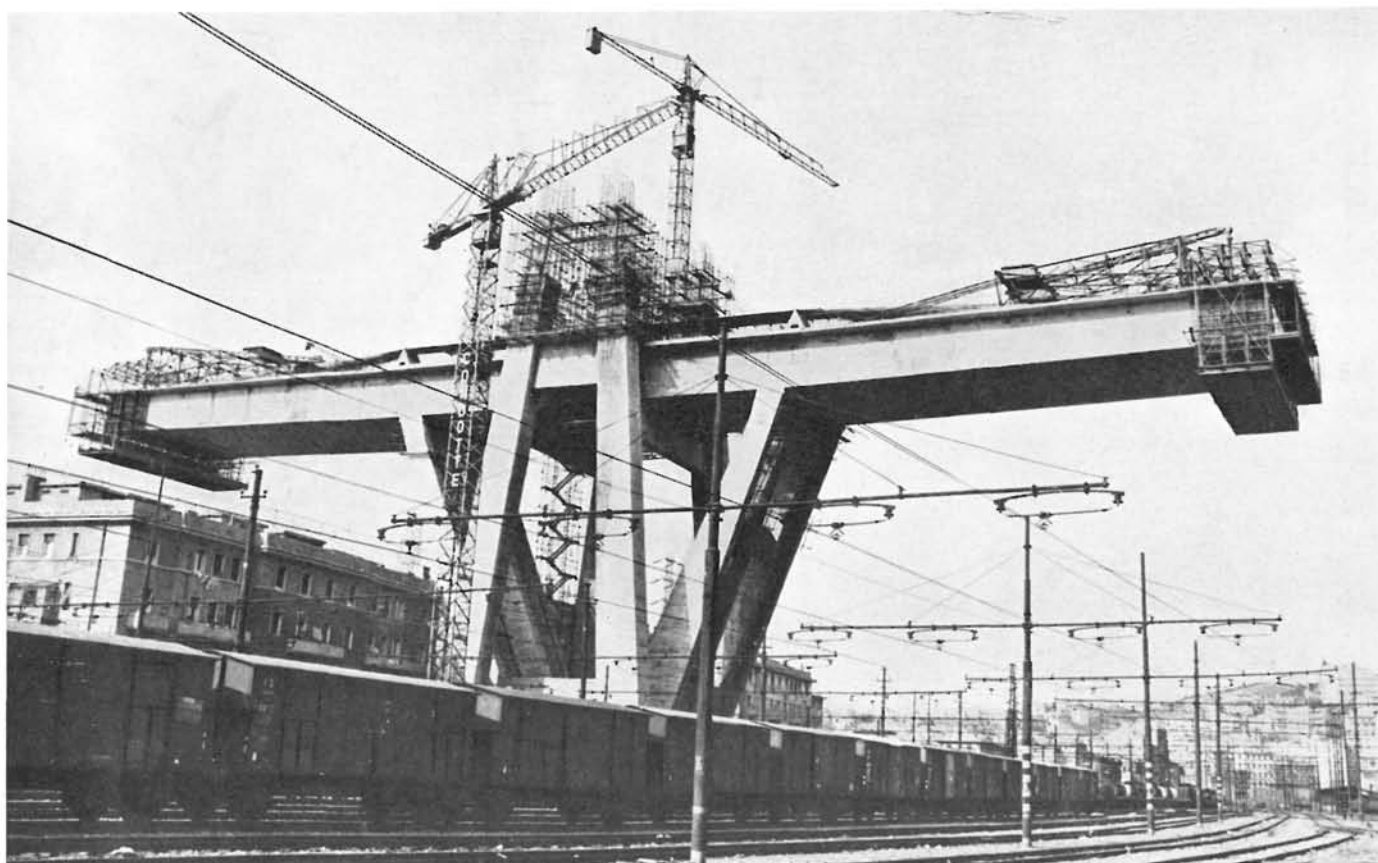
Cables provisionales.

Pasarela de servicio para el montaje de los tirantes.



Montaje de los tirantes.

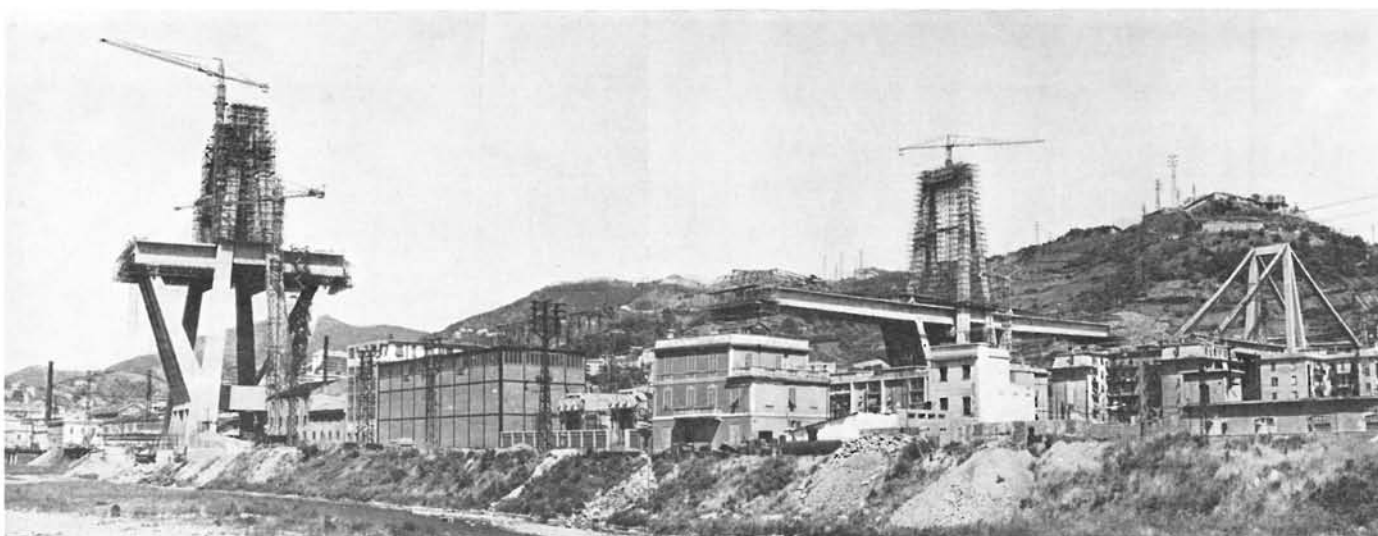




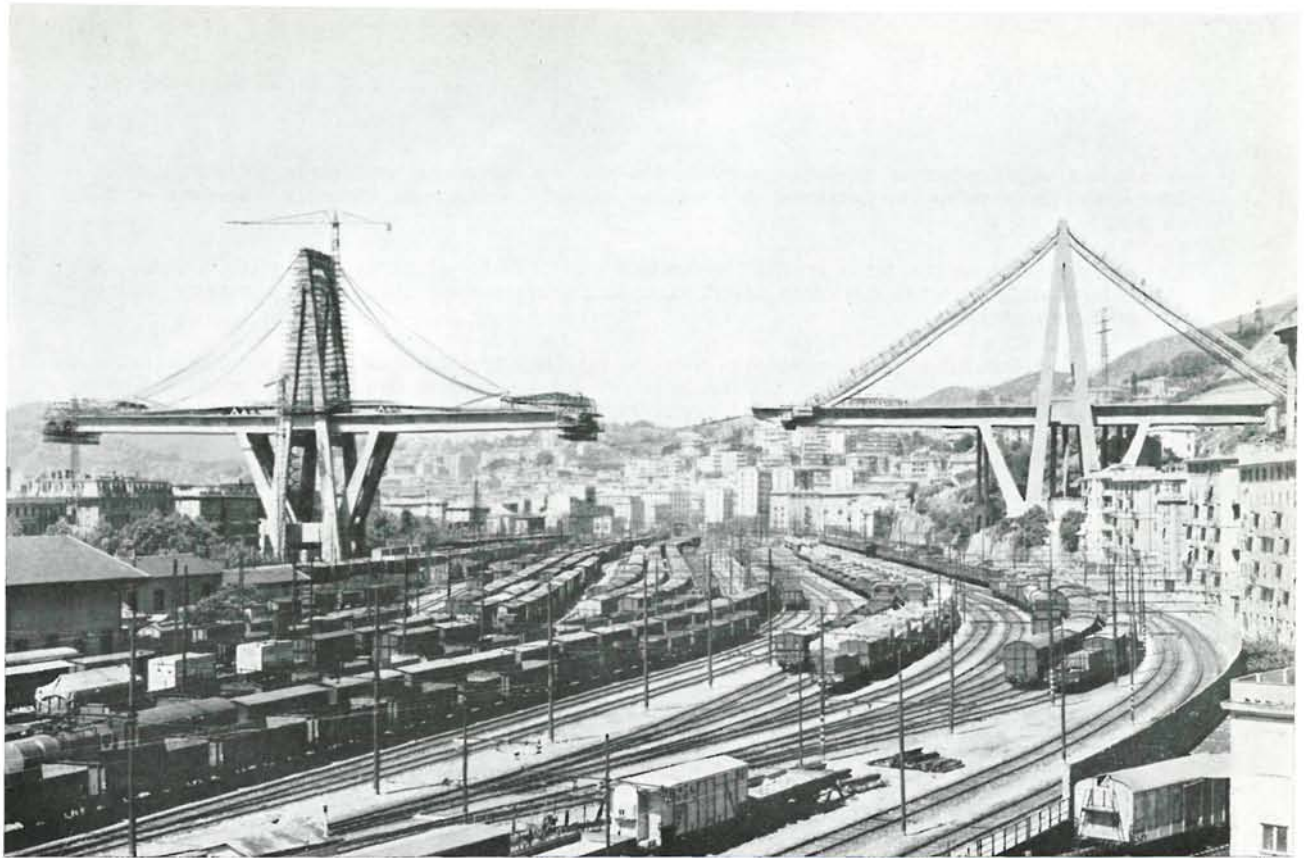
El sistema número 9 en construcción.

Los tirantes, que son haces de alambres de acero especial $R = 170 \text{ kg/mm}^2$ y diámetro nominal de 1,27 cm, están unidos al armazón por medio de un travesaño adecuado y pasan sobre la antena, pesando sobre una costilla especial formada por planchas y perfiles laminados hundidos en la masa de hormigón.

Naturalmente, para caso de cargas permanentes, simétricas respecto al plano vertical (normal al eje del viaducto) que pasa por el eje del sistema, y habiendo sido ejecutada una maniobra de tensión de los tirantes (por medio de un gato hidráulico) tal que los puntos de enganche de dichos tirantes con las vigas no tengan un



Los sistemas números 10 y 11 casi terminados y el número 9 en fase de ejecución.



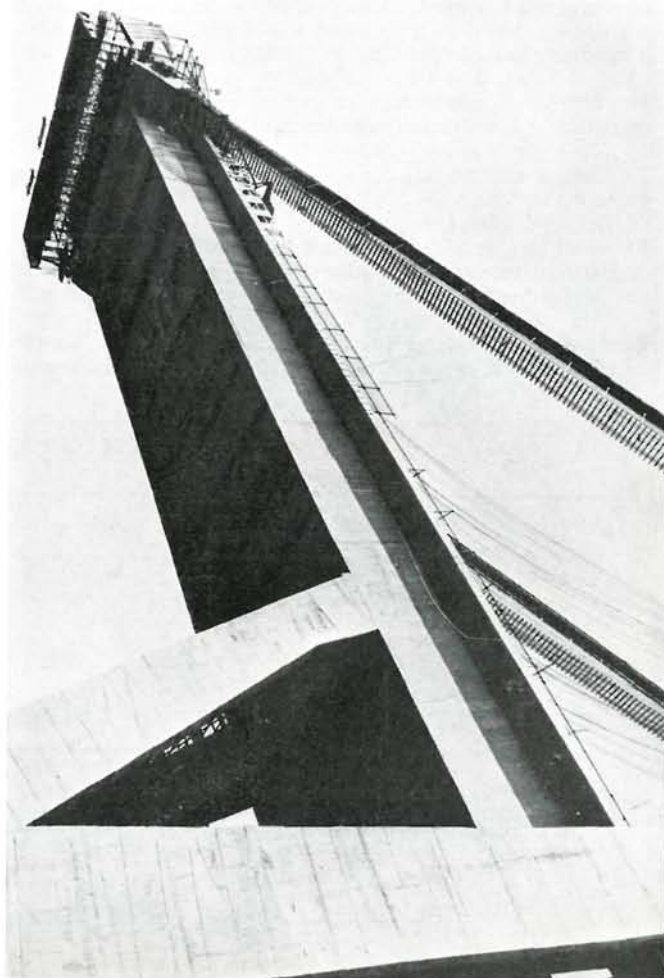
El sistema número 10 en construcción, con el sistema número 11 ya terminado.

Construcción del sistema número 11.

descenso repentino respecto de la geometría del proyecto, el sistema está en equilibrio y el entramado se comporta como un sistema continuo sobre cuatro apoyos rígidos, en los cuales se produce el esfuerzo de autopretensado determinado por la componente horizontal de la tensión de los tirantes.

Por tal proceso cada tirante está formado por 352 alambres de 1,27 cm de diámetro, mientras el entramado resulta prácticamente privado de armadura longitudinal, a excepción del extremo del salto y de la zona próxima a los apoyos intermedios.

En este punto, es decir, con la obra prácticamente terminada, falta por efectuar una operación, que podría definirse como «homogeneización del sistema»: construir alrededor de los tirantes una vaina adecuada de hormigón que se pone en coacción por medio de otros cables (por un conjunto de otros 113 alambres de 1,27 cm de diámetro) paralelos a los que ya están



en servicio, cuyos extremos inferiores, provisionalmente, no afectan al entramado horizontal. Esto se hace con el fin de evitar que la tensión de los cables añadidos ejerza una torsión no deseada en dicho entramado.

La vaina de hormigón, por tanto, resultará comprimida en un grado tal que el futuro tránsito de las sobrecargas horizontales determinará en la misma vaina una descompresión, sin alcanzar por esto el valor cero (compresiones positivas).

Finalmente se efectuará la prolongación de los cables auxiliares de modo que ahora afectarán al entramado, y por ello colaborarán en adelante, y con la misma tensión unitaria, con los que ya están en servicio, y se procederá a las acostumbradas inyecciones de lechada de cemento.

Después de este momento todo el sistema, entramados y sus apoyos, antenas y tirantes, constituirán un sistema homogéneo continuo que resistirá, como tal, en estado elástico, las acciones debidas a sobrecargas accidentales, a variaciones térmicas y al viento.

Como es bien notorio, las principales ventajas que presenta la operación de homogeneización pueden resumirse así:

- 1) eliminación del agrietamiento de las vainas y, por ello, eliminación de la posibilidad de dañar el acero por causa de los agentes atmosféricos, evitando lesiones;
- 2) reducción de la amplitud del campo de variación de las sollicitaciones en el acero, con el consiguiente aumento de seguridad por fatiga debida a tensiones ondulantes;
- 3) reducción de las rotaciones del entramado en correspondencia con los apoyos sobre los puntales oblicuos, por reducción de los alargamientos de los tirantes ante el paso de cargas accidentales;
- 4) reducción de los desplazamientos horizontales longitudinales de la cumbre del sistema antena, por efecto de la distribución asimétrica de sobrecargas accidentales (1).

Se hace notar que cada sistema compensado (por el hecho de estar unido al sistema adyacente por medio de entramados apoyados, con uno de los enlaces que desliza libremente) es prácticamente insensible a las variaciones térmicas, al menos a lo largo del entramado, a excepción, naturalmente, del tramo de pequeña longitud comprendido entre las pilastras inclinadas que forman los dos apoyos centrales.

Por último, se puede afirmar que el sistema no presenta desplazamientos horizontales apreciables por efecto de la distribución asimétrica de las cargas accidentales, dada su configuración compensadora.

El sistema número 11, que es el último hacia Génova, presenta algunas características singulares respecto de los otros.

En particular, uno de los dos extremos, el situado hacia Génova, está encajado en un bloque de hormigón solidario al terreno por medio de una empalizada de hormigón con pilotes inclinados y, como consecuencia, básicamente privado de asientos verticales y horizontales y de rotaciones.

Obviamente el sistema presenta, también debido a las cargas permanentes, una asimetría que debe tenerse en cuenta tanto en el estado del sistema no homogéneo como en el del sistema homogéneo.

HORMIGONES

Clase	Dosificación del cemento	Resistencia de las probetas a los 28 días		Módulo elástico a los 28 días		Destino
		Teórica prescrita	Práctica media	Teórico prescrito	Medio en laboratorio	
I	200/600	150	160	—	—	Cimientos inferiores. Estructura de cimentación. Estructura no pretensada. Estructura pretensada.
II	300/600	200	250	—	—	
III	300/730	350	380	300.000	350.000	
IV	350/730	480	520	350.000	400.000	

(1) Para una más completa información sobre sistemas compensados homogeneizados véase:

- Riccardo Morandi: Sobre condiciones de seguridad del funcionamiento de tirantes sometidos a cargas variables. «Il Cemento», 1964.
- Riccardo Morandi: Sobre algunos tipos de puentes en hormigón pretensado con tirantes. Atti del Politecnico di Milano. Curso de especialización para la construcción en hormigón armado, 1964.

Todos los cálculos, y en particular los necesarios para los sistemas números 9 y 10, han sido controlados por medio de un modelo preparado y estudiado por la I.S.M.E.S., de Bérgamo, que ha confirmado, dentro de límites aceptables, los resultados de los cálculos estáticos.

Queda poco que añadir a la descripción del proyecto en cuanto se refiere a las obras complementarias.

La pavimentación, los pretilos y el encintado, los aparejos fijos y móviles de los apoyos y, por último, las juntas, se han efectuado según el método normal actualmente empleado en todas las autopistas italianas.

ACEROS

Tipo	Características	Destino
A1	Reglamentación italiana Aq. 42.	Obras de cimentación.
A2	Reglamentación italiana Aq. 50.	Pilar y estribos.
A3	De alta resistencia y adherencia mejorada $R = 44 \text{ kg/mm}^2$.	Pilar y estructura pretensada.
A4	Alambre reglamentario italiano $R = 170 \text{ } \phi \text{ } 7$ para estructuras pretensadas.	Cables de pretensado.
A5	Alambres reglamentarios italianos $\phi \text{ } 1,27 \text{ mm}$ $R = 170$ para estructuras pretensadas.	Tirantes.

Tercera parte

Materiales adoptados. Su calidad y cantidad, y tensiones internas máximas

a) Características de los materiales adoptados.

En la tabla se indican las principales características de los materiales adoptados.

b) Tensiones máximas de servicio en distintas partes de la obra.

Macizos de cimentación:

$$\sigma_c = 65 \text{ kg/cm}^2; \quad \sigma_a = 1.400 \text{ kg/cm}^2.$$

Estructuras de elevación inclinadas y horizontales de los sistemas paratriangulares números 3, 4, 5, 6, 7 y 8 y de las pilas y estribos de los distintos empalmes:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 100 \text{ kg/cm}^2; & \sigma_f &= 1.600 \text{ kg/cm}^2; \\ \tau &= 6 \text{ kg/cm}^2. \end{aligned}$$

Entramados de los empalmes:

$$\sigma_c = 100 \text{ kg/cm}^2; \quad \sigma_f = 2.200 \text{ kg/cm}^2.$$

Elevación de los sistemas compensados:

Hormigón:

$$\sigma_c = 90 \text{ kg/cm}^2.$$

Cables de pretensado:

- a tiempo cero: $\sigma_a = 12.000 \text{ kg/cm}^2$;
- a tiempo infinito: $\sigma_a = 9.000 \text{ kg/cm}^2$.

Tirantes:

$$\sigma_a \text{ máx.} = 7.500 \text{ kg/cm}^2; \quad \sigma_a \text{ mín.} = 6.900 \text{ kg/cm}^2.$$

c) *Cantidad de los materiales empleados.*

A continuación se indica en la tabla la cantidad de los materiales empleados, medidos por metro cuadrado de firme de carretera, excluidos los pilotes y macizos de cimentación:

Partes de la obra	Superficie del tablero (m ²)	Hormigón (m ³ /m ²)	Acero para c. a. (kg/m ²)	Acero para cables de pretensado y tirantes (kg/m ²)
Empalme Savona-Génova.	969	0,52	60	—
Empalmes Génova-Serravalle y Serravalle-Génova.	4.036	0,74	75	—
Sistemas 1 y 8.	9.090	0,85	110	7
Sistemas 9, 10 y 11.	10.754	1,88	115	48

Cuarta parte

Método de ejecución de los sistemas compensados

Mientras los métodos de ejecución de todas las estructuras de los distintos empalmes y de los sistemas paratriangulares para las luces pequeñas no merecen descripción especial, dada la adopción del sistema esencialmente tradicional, no puede decirse lo mismo en lo que se refiere a los sistemas compensados números 9, 10 y 11.

Conviene sobre todo no olvidar que dichos sistemas compensados atraviesan parques ferroviarios de intensísimo tráfico en los que no había espacio para colocar soportes provisionales, a menos de perturbar de modo insoportable el movimiento de los convoyes.

Por esto, se ha tenido que adoptar un método de ejecución que uniese las características de máxima seguridad a las de no poner ningún impedimento ni sujeción al servicio ferroviario.

Al acabar la obra puede afirmarse que las previsiones han sido totalmente realizadas sin que se haya derivado ninguna molestia recíproca, ni para la construcción del puente ni para el servicio ferroviario.

Este brillante resultado se debe a la escrupulosa planificación de todas las fases de la ejecución, así como a la continua vigilancia de todos los capataces, a cuya disposición se había puesto también un eficaz sistema de controles geométricos y tensiométricos.

Naturalmente, se ha tenido que redactar previamente el proyecto de las distintas fases de ejecución y, para cada una de ellas, determinar las deformaciones y tensiones internas sucesivas de cada disposición de los elementos.

El cálculo de las deformaciones ha obligado asimismo a una determinación de la ley de variaciones de los módulos elásticos de los hormigones, al término del período de ejecución de cada fase.

Por tanto, la tarea principal de los operarios ha consistido en controlar la correspondencia de los desplazamientos y las rotaciones reales con los calculados en el proyecto.

El programa de ejecución se ha dividido en tres fases sucesivas, que se indican a continuación:

1.ª Fase:

Lanzamiento de la antena y del caballete.

En esta primera fase se ha construido la antena R-S-O y el caballete M-I-D-E-N por procedimientos normales. Se ha tenido cuidado, antes del lanzamiento del tramo D-E del entramado (que está soportado por una cimbra especial de tubos metálicos), de conseguir, por medio de cables pretensados entre dichos puntos D-E, una torsión adecuada de los extremos de los dos elementos inclinados de modo que se eliminen las tensiones acumuladas en dichos extremos por efecto de la inclinación de aquéllos, realizándose estos lanzamientos por tramos, con el auxilio de montantes en forma de cajón que gravitan sucesivamente sobre las partes ya realizadas y endurecidas.

2.ª Fase:

Lanzamiento simultáneo de los tramos C-D y E-F del entramado.

El lanzamiento de los tramos C-D y E-F del entramado se realiza utilizando el conocido método «paso a paso».

Es decir, se ha procedido a realizar cada tramo por medio de trece piezas sucesivas, de 5,13 m de longitud cada una, confiadas al resto de la estructura por medio de un sistema de cables pretensados superiores, exteriores y provisionales, que se quitan después de haber terminado su función, sustituida entonces, como es notorio, por un cierto momento debido a la acción longitudinal horizontal de los tirantes definitivos.

Estos cables, de desarrollo subhorizontal, han asumido su configuración prefijada por medio de dos pequeños caballetes provisionales contruidos en correspondencia con los puntos D y E.

Un sistema ulterior de tirantes provisionales, que pasan sobre la cúspide de la antena, ha sostenido el considerable peso representado por los travesaños en C y en F, cuya función es la de determinar la unión estática entre el tablero y los extremos de los tirantes C-O-F.

Naturalmente, la operación de transformación del campo tensional interno del entramado, entre el comportamiento en doble voladizo y el de una viga continua de tres luces, que consiste en el montaje y puesta en tensión gradual de todos los tirantes C-O-F y simultáneamente en una análoga eliminación gradual de todos los tirantes provisionales, ha representado siempre el punto más delicado de toda la ejecución de la obra. Tal operación, controlada como ya se ha dicho con oportunos sistemas geométricos y tensiométricos, ha sido ejecutada en todo momento sin ningún inconveniente y, al término de la misma, el entramado B-G ha denunciado el comportamiento de una estructura continua en la que los puntos C-F estaban colocados más altos que en su posición definitiva (con la consiguiente torsión elástica del entramado), siendo esta elevación de un valor tal que cuando en B y en G han sido apoyados los entramados de la clave entre dos sistemas contiguos, dichos puntos C-F han ocupado su posición definitiva (con la consiguiente desaparición de las torsiones elásticas y, por tanto, sensiblemente, de cada sobretensión).

3.ª Fase:

Construcción de la vaina de hormigón y su puesta en coacción.

La construcción de la vaina de hormigón se ha realizado colocando en los tirantes los encofrados que después han contenido la pasta.

En primer lugar, las coladas se han limitado a producir piezas de 3 m de longitud, con objeto de conseguir que la variación de la catenaria, que se producía en los tirantes por efecto del peso de la vaina, no introdujese en ellos tensiones peligrosas por torsión.

Acabada la colada y alcanzado el endurecimiento de las distintas piezas de las vainas, éstas se han hecho continuas, rellenando con hormigón las juntas preparadas entre ellas; después se ha procedido a su puesta en coacción sin otro efecto, como se ha explicado más arriba, que los puntos C y F sufrieran un sensible descenso vertical.

Por tanto, como conclusión, podemos afirmar que el método de ejecución ha permitido anular en las distintas disposiciones de los elementos los «acuerdos» de tensiones transitorias, debidas a las diferentes fases de construcción, por medio de un esmerado estudio de las sucesivas torsiones, controlado atentamente en un centro ejecutivo.

Quinta parte

Cargas y tiempos de ejecución de los sistemas compensados

A continuación se suministran algunos datos referidos tanto a la mano de obra como a los tiempos medios necesarios para la ejecución de los tres sistemas compensados.

Acerca de la mano de obra, siguiendo las clasificaciones de la parte anterior, se especifica lo siguiente:

1.ª Fase:

Construcción de los caballetes y de la antena.

La ejecución de esta parte de la obra presenta características normales, unidas sobre todo al uso de encofrados móviles y de apuntalamientos provisionales con tubos de acero.

En conjunto, la mano de obra empleada para cada m³ de hormigón en la construcción de las cimbras, armaduras, encofrados, manufacturas y puesta en obra de las armaduras metálicas, lanzamiento y des-cimbramiento, resulta ser la siguiente:

- horas de operario por m³ de hormigón: 20,86.

2.ª Fase:

Construcción de los tramos C-D y E-F del entramado.

También en esta fase se indica a continuación la cantidad de mano de obra empleada y referida al metro cúbico de hormigón construido para:

- montaje y desmontaje de vagonetas, montaje y desmontaje de los encofrados, colada del hormigón, montaje, lanzamiento y eliminación de los tirantes provisionales;
- horas de operario por m³ de hormigón: 14,15.

3.ª Fase:

Construcción de las vainas y tirantes y su pretensado.

Como se ha indicado, la cantidad de mano de obra que se refiere a: montaje y desmontaje de los encofrados, colada del hormigón, soldadura de las juntas provisionales, pretensado de los tirantes adecuados y su alargamiento; retirada de todas las tensiones de los tirantes para la operación de equilibrar las distintas cuaternas de alambres y, por último, la ejecución de todas las inyecciones de los tirantes con lechada de cemento:

- horas de operario por m³ de hormigón: 49,13.

Por término medio, para la construcción de toda la obra, incluidos los cimientos y excluidos los pilotes, se han empleado 15,69 horas por m³ de hormigón colocado.

En lo que se refiere al tiempo empleado para la construcción de la obra, se prefiere referir los tiempos empleados en la construcción de un sistema compensado, dado que el período de tiempo empleado en la construcción de la obra completa (1962-1967) ha sido influenciado notablemente por varias considerables dificultades encontradas para aislar, aclarar y resolver los problemas derivados de la necesidad y de los intereses de varias entidades públicas y privadas implicadas en el ámbito del área de cimentación de la obra. Basta pensar, por ejemplo, en la transformación que se ha considerado necesario efectuar en el densísimo sistema de líneas de tendido eléctrico y el justificado derecho de algunos organismos técnicos del Ferrocarril del Estado de estudiar (por medio del examen de la considerable cantidad de proyectos elaborados) el grado de seguridad global necesario para autorizar el paso sobre tan comprometido obstáculo como es esta importante vía férrea.

Por ejemplo, para la construcción del sistema número 9 han sido necesarios los siguientes programas de días naturales y consecutivos:

Estructura	Días
Cimientos	101
Parte elevada	472
Construcción y lanzamiento de los tableros apoyados	30
Revestimiento y pretensado de las vainas de los tirantes	82
Total de días	685

Construcción del sistema número 10.
Construcción del sistema número 11.

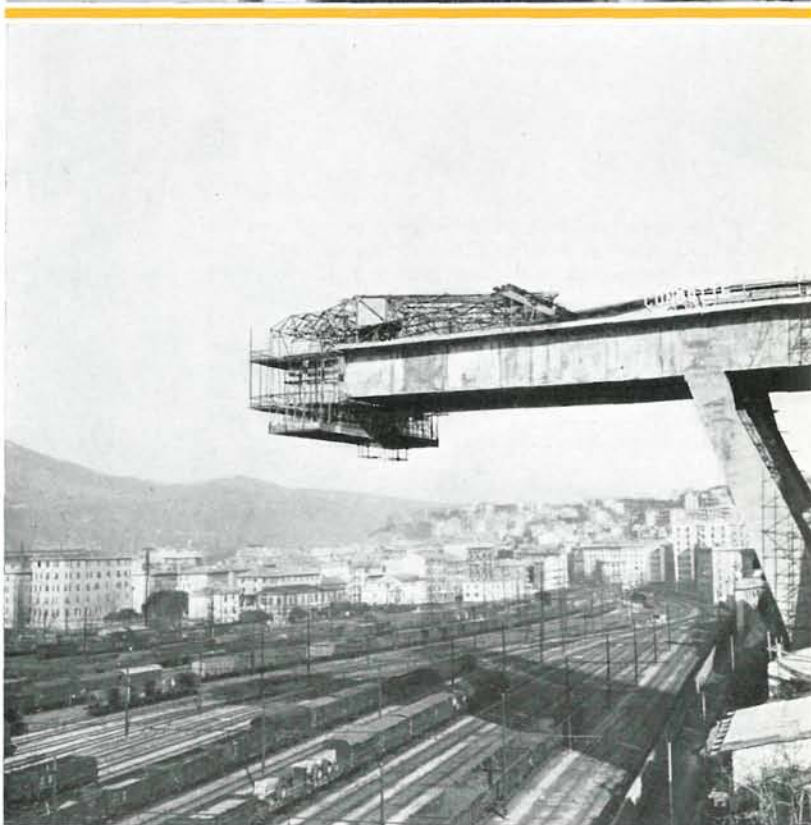
Esto significa que, en la hipótesis de construir dos sistemas compensados simultáneamente, hubiera sido posible acabar un viaducto de longitud $l=2 \times 208 = 416$ m en un tiempo teórico de casi 23 meses.

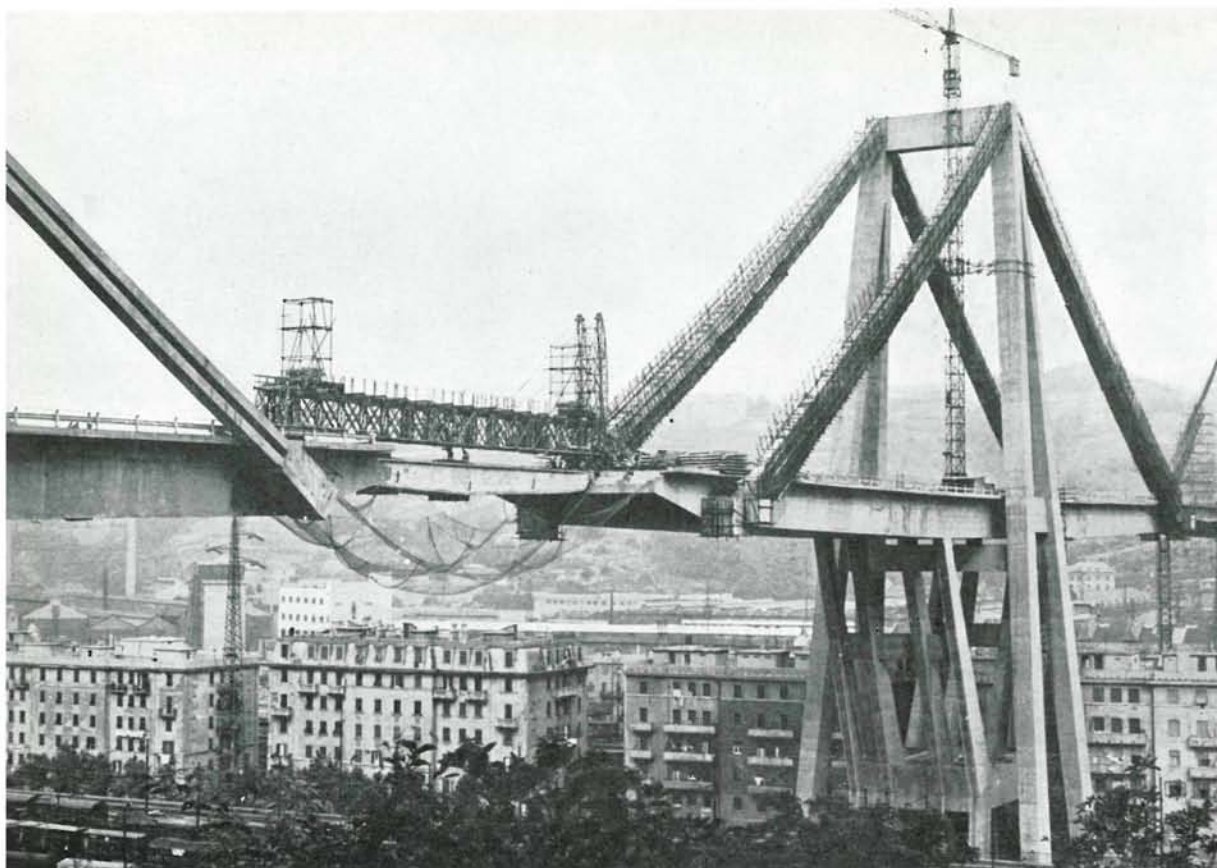
Si el dato que se indica arriba se confronta con un puente de luz análoga contruido hace poco en Alemania (el puente de Benford, cerca de Coblenza) se nota una equivalencia aproximada de los tiempos de construcción de las dos obras, de donde la cantidad de los materiales empleados resulta comparable, a excepción del acero de altísima resistencia para los cables pretensados.

En efecto, en el viaducto de Polcevera, incluidos los tirantes, ha sido puesta en obra una cantidad de acero (por m^2 de tablero), en paridad de luz, como ya se ha indicado, de casi $1/3$ de la empleada en el puente de Benford; esto, habiendo cuidado mucho las diferentes tensiones máximas en las que dicho acero está solicitado en estas dos obras de arte.

Antes de la apertura al tráfico se han efectuado toda suerte de pruebas con el fin de controlar desplazamientos y variaciones de tensiones en secciones singulares al paso de trenes de cargas móviles, de las características más parecidas posibles a las adoptadas en los cálculos y en las pruebas sobre modelos.

Dichas pruebas de carga han confirmado las previsiones de cálculo y los valores de los módulos elásticos aparentes e instantáneos; de esas pruebas determinadas resultan reglas superiores a las previsiones teóricas, mientras las deformaciones residuales, después de la descarga, han resultado muy pequeñas respecto a aquéllas bajo carga.





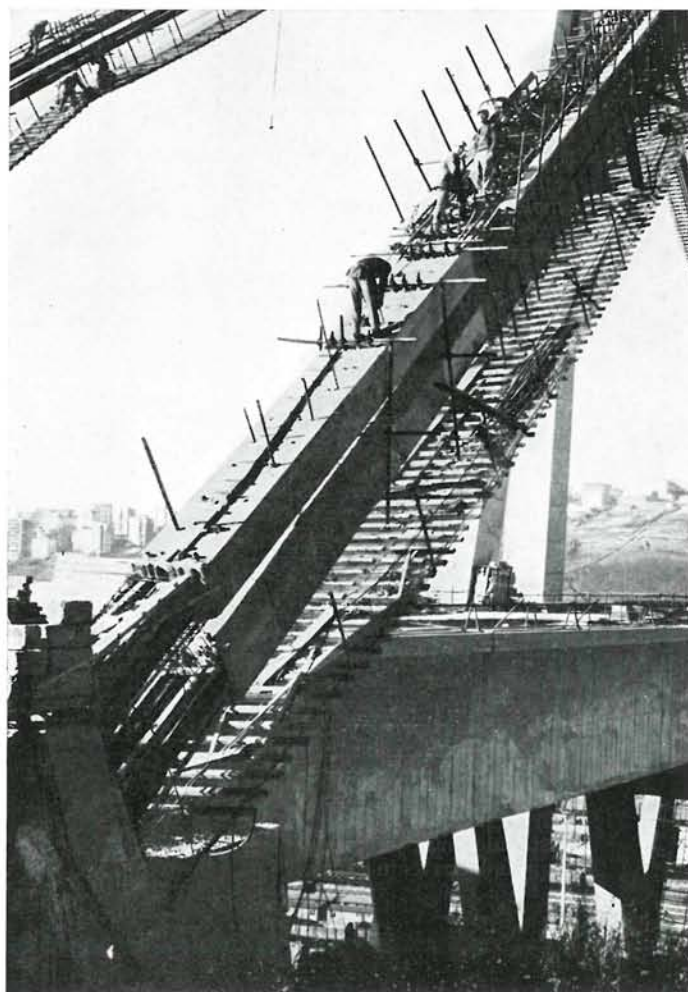
Lanzamiento de las vigas entre los sistemas números 10 y 11.

La obra, proyectada y dirigida por el que escribe, con la colaboración del ingeniero Claudio Cherubini, ha sido realizada por la Sociedad Italiana de Conducciones de Agua de Roma.

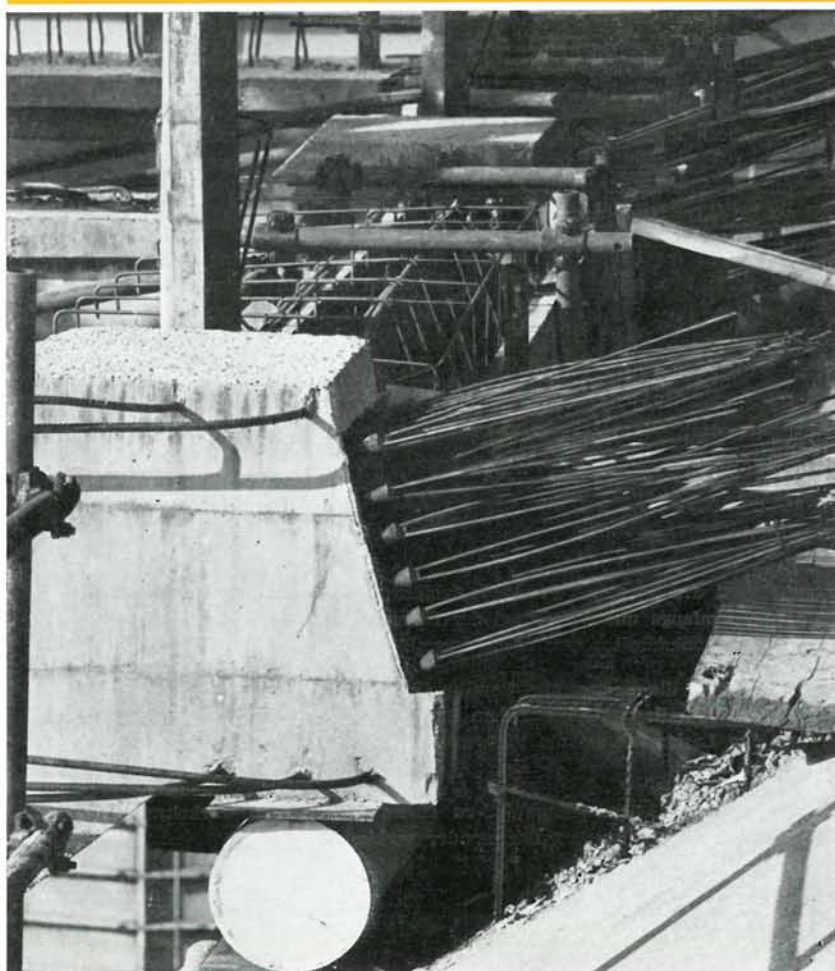
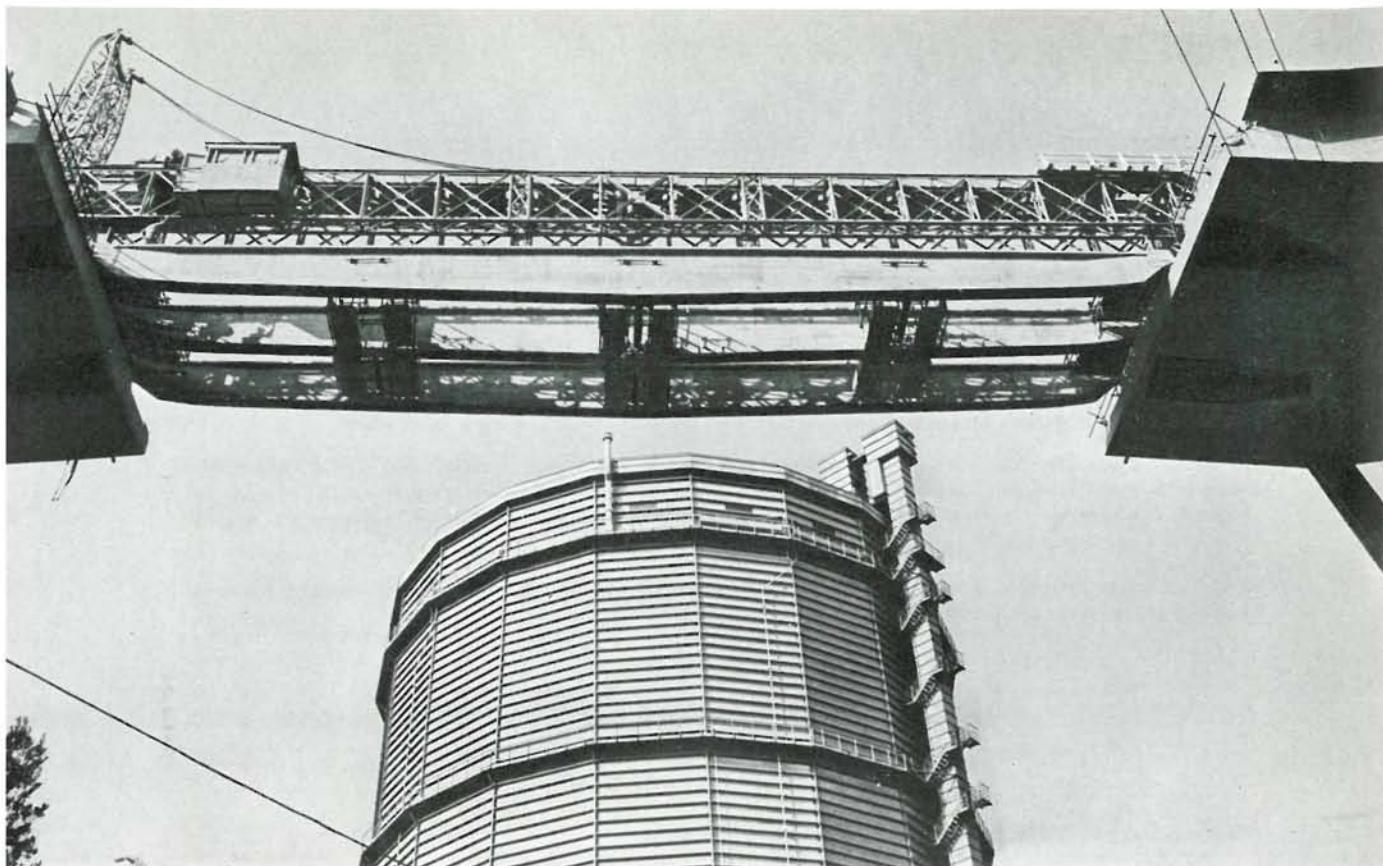
La organización de la obra ha sido dirigida por el Dr. Ing. Luigi de Sanctis Linotti, que ha cuidado en particular la preparación de los suministros de la obra y ha ideado el método de lanzamiento del entramado prefabricado.

La oficina especial de autopistas de Liguria, de la A.N.A.S., ha supervisado la obra por cuenta de la Stazione Appaltante.

La Universidad de Génova (Instituto de Ciencias de la Construcción. Profesor Ing. Baldacci) ha realizado todas las medidas de control durante el pretensado de los cables y las pruebas



86 Construcción de las vainas alrededor de los tirantes.



Lanzamiento de las vigas entre las pilas números 3 y 4.

Uno de los extremos de las vigas apoyadas.

de aptitud de los materiales; éstas han sido dirigidas por el Profesor Ing. Carlo Greco, en su calidad de experto de la Comisión de aptitud en el curso de la obra, compuesta por los siguientes:

Dr. Ing. Pasquale Prezioso, Presidente.

Dr. Ing. Mario Rubino, Vocal.

Dr. Ing. Quinto Zechini, Vocal.

Traducido y adaptado por A. Barbero.

Viaduc sur la Polcevera, à Gênes, Italie

Prof. Ing. Riccardo Morandi

Le progrès de la technique du béton précontraint a permis l'exécution de cet ouvrage d'une importance considérable et dont la réalisation présentait de grandes difficultés à cause de son volume et du fait que son emplacement obligeait à faire alterner la construction avec d'autres services publics inéluctables.

Les solutions adoptées sont adéquates et offrent toutes les garanties pour franchir des portées considérées prohibitives jusqu'à présent, ainsi que pour réduire au minimum les surfaces d'appui sur le terrain. La structure a été conçue pour travailler en collaboration avec les charges auxquelles elle est soumise. Ainsi a été réalisée une considérable économie de matériaux.

Le viaduc sur la Polcevera, à Gênes, de 1.102,45 m de longueur, est devenu un important noeud de communications, reliant deux autoroutes à l'aide d'un passage surélevé.

Polcevera viaduct, at Geneva, Italy

Prof. eng. Riccardo Morandi

The construction of this important project has only been possible thanks to the progress achieved in prestressed concrete technology. The work involved considerable difficulties due to the size of the project and the location, which made it necessary to complete this bridge simultaneously with other essential public facilities.

Suitable solutions to this problem have been found, which made it feasible to bridge over spans, which previously were regarded as prohibitive. These solutions were also consistent with an optimum reduction of the area on which the bridge is supported. The structure has been designed to show maximum efficiency under the applied loads which will act on it, and this has saved a considerable amount of material.

The Polcevera viaduct, at Geneva, of 1,102.45 ms length has become an important connecting point in the local system of communications, and links two motor roads by means of an elevated roadway.

Viadukt über den Polcevera, Italien

Prof Ing. Riccardo Morandi

Die fortschreitende Technik auf dem Gebiet des Spannbetons hat die Ausführung dieses Bauwerks ermöglicht, das grosse Schwierigkeiten wegen seines Umfangs und auf Grund der Tatsache, dass seine Lage gleichzeitig den Bau anderer öffentlicher Einrichtungen unerlässlich machte, verursachte.

Es sind geeignete Lösungen gefunden worden, die zudem alle Gewähr für Spannweiten bieten, die bisher als unmöglich betrachtet wurden und die die Auflagerfläche auf dem Boden auf ein Minimum zurückführen. Die Struktur wurde im Einklang mit den Lasten, denen sie ausgesetzt ist, entworfen, wodurch eine beträchtliche Materialersparnis erzielt wurde.

Der Viadukt über den Polcevera in Genua von 1.102,45 m Länge ist zu einem bedeutenden Verkehrsknotenpunkt geworden, der zwei Autobahnen durch einen Übergang miteinander verbindet.