

EL PUENTE KAP SHUI MUN EN HONG KONG

UN PUENTE ATIRANTADO DE 2 PISOS PARA TRÁFICO CARRETERO-FERROVIARIO

Dipl.-Ing. Reiner Saul.

Socio, Leonhardt, Andrä und Partner GmbH.

Stuttgart • Berlin • Dresden • Erfurt (Alemania).

NOTA DE LA REDACCIÓN: El ilustre ingeniero alemán Reiner Saul, socio de uno de los despachos más destacados en el mundo de las estructuras, nos ha remitido dos artículos de los cuales nos honramos en publicar, con nuestro agradecimiento, el primero de ellos, al que seguirá el segundo de manera inmediata.

RESUMEN

El puente Kap Shui Mun conecta las islas Ma Wan y Lantau; es un puente atirantado con tablero de dos pisos y con una luz principal de 430 m y luces laterales de 2 x 80 m en ambos lados. El tráfico carretero se halla en el piso superior y el tráfico ferroviario más arcones de emergencia para vehículos –que garantizan al acceso al aeropuerto incluso en caso de tifones– en el piso inferior. Los 387 m centrales de la superestructura son una estructura compuesta, rigidizada por vigas Vierendeel; el resto de la superestructura es de hormigón pretensado. Las torres, con forma de H, son de hormigón y los cables son del tipo de cordones paralelos. La parte de hormigón pretensado del tablero se ha construido mediante el proceso de empuje acompasado, sirviendo los primeros 24 m de la estructura compuesta como pescante de avance. La construcción del puente empezó en la primavera del 1993 y se terminó en abril 1997.

ABSTRACT

The Kap Shui Mun suspension bridge connecting the Islands of Ma Wan and Lantau is 430 m. long with two lateral spans of 50 m. on both sides. The upper deck carries road traffic and the lower deck the railway line and also emergency roadways to ensure access to the airport during typhoons. The central 347 m. part of the structure is a composite structure sustained by Vierendeel beams, the rest of the structure being of reinforced concrete. The H-shaped towers are of concrete and the cables arc of parallel strands. The prestressed concrete of the deck was constructed by gradual compression, using the first 24 m. of the composite structure as the mounting. The construction of the bridge was begun in the spring of 1993 and completed in april 1997.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El desplazamiento del aeropuerto de Hong Kong de Kai Tak a Chek Lap Kok en el norte de la isla de Lantau requiere un sistema completamente nuevo de rutas y ferrocarriles de acceso. El puente Kap Shui Mun, que forma parte del llamado Lan-

tau Fixed Crossing, cruza el canal Kap Shui Mun y conecta las islas Ma Wan y Lantau.

El puente se ha licitado en una competencia de diseño y construcción.

1.2 REQUIRIMIENTOS BÁSICOS PARA EL DISEÑO

El canal de navegación tiene un ancho de 275 m y un altura de 47 m sobre el nivel de referencia.

Se admiten
comentarios a este
artículo, que deberán
ser remitidos a la
Redacción de la ROP
antes del 30 de
agosto de 1998.

Recibido en ROP:
mayo de 1998

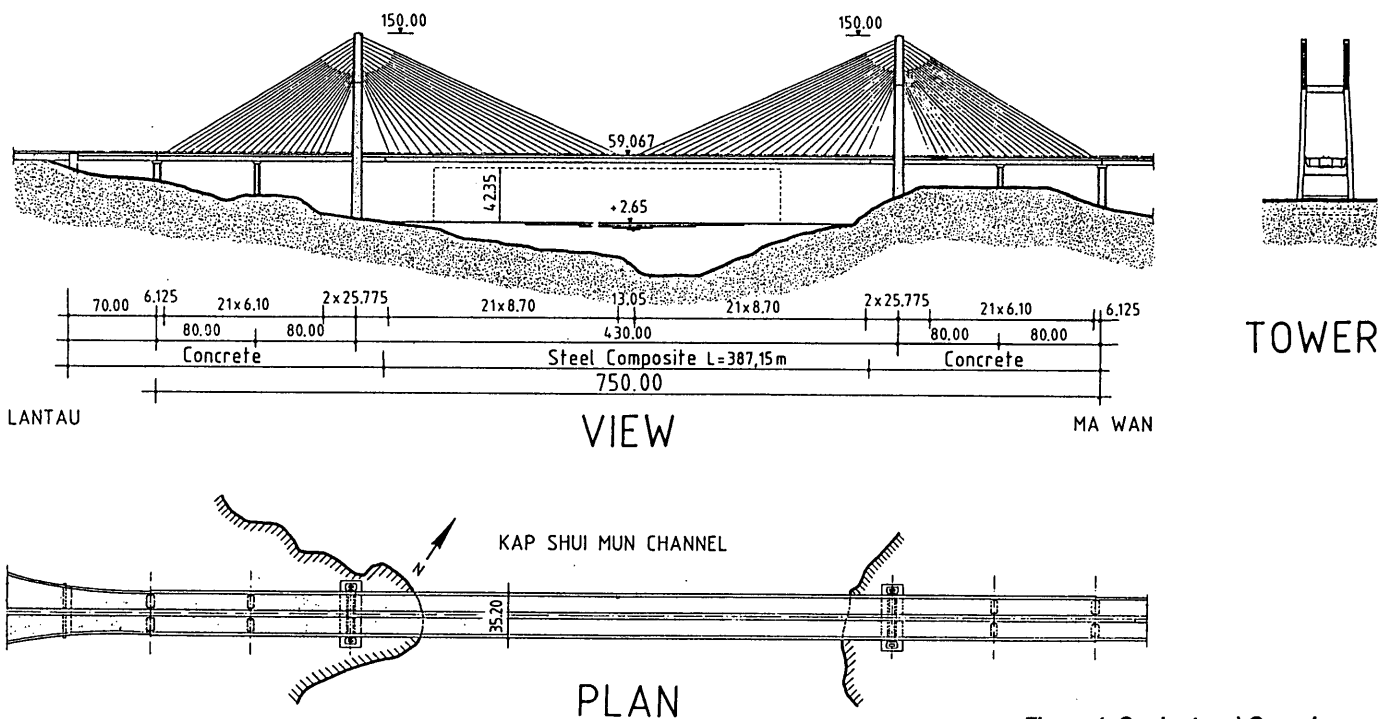
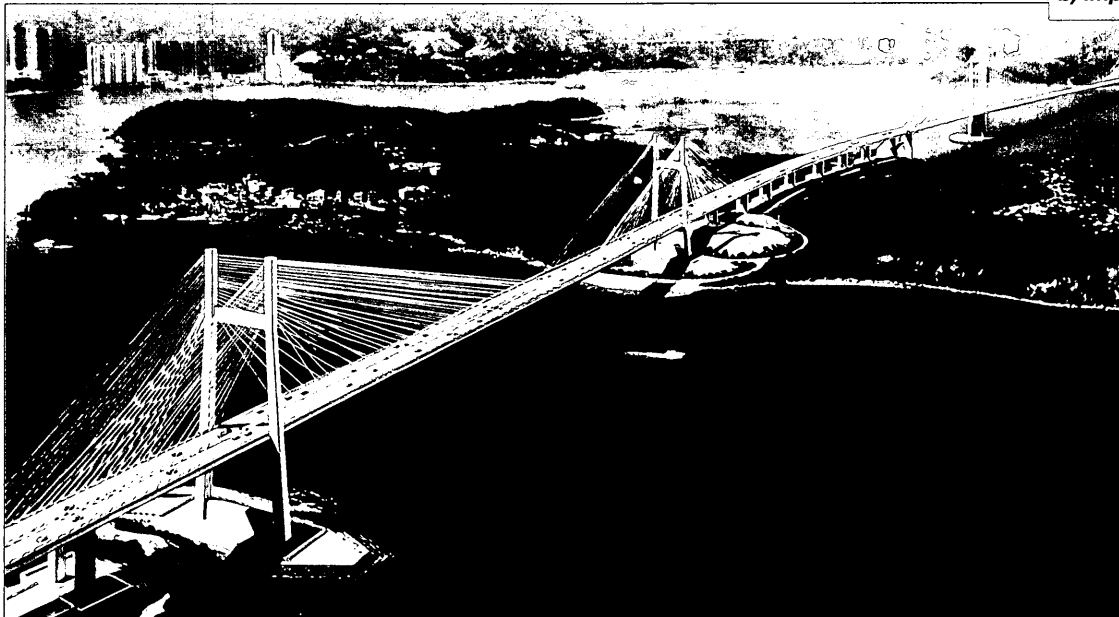


Figura 1. Conjunto, a) Croquis, b) Impresión artística.



El alineamiento horizontal del puente es recto con excepción de aproximadamente 48 m en el lado de Man Wan. El alineamiento vertical es circular con $R = 10175$ m para los 305,25 m centrales y tiene una inclinación de 1,5 % para el resto.

El puente Kap Shui Mun es –como el puente colgante Tsing Ma y los viaductos Ma Wan adyacentes– un puente de doble piso. El piso superior lleva una calzada doble de tres vías, el piso inferior el ferrocarril suburbano de 2 vías y 2 vías de emergencia, con ancho de 5,5 m, que garantizan el acce-

so al aeropuerto nuevo incluso en el caso de tifones.

El puente tuvo que diseñarse de acuerdo con BS 5400 para una vida útil de 120 años y el vehículo HB 45, y para el ferrocarril suburbano de 30 kN/m x vía.

La estabilidad aerodinámica tuvo que garantizarse para una velocidad horizontal del viento hasta 340 km/h para el puente descargado y hasta 180 km/h para el puente cargado.

2. DISEÑO

2.1 GENERALIDADES

El puente Kap Shui Mun es un puente atirantado con luces de 80 m - 80 m - 430 m - 80 m - 80 m = 750 m, lo que da una relación de luces laterales a luz principal de $160/430 = 0,37$. La altura de los torres sobre el tablero es 97 m correspondiente a 0,22 de la luz principal, Figura 1. Los cables tienen una confi-

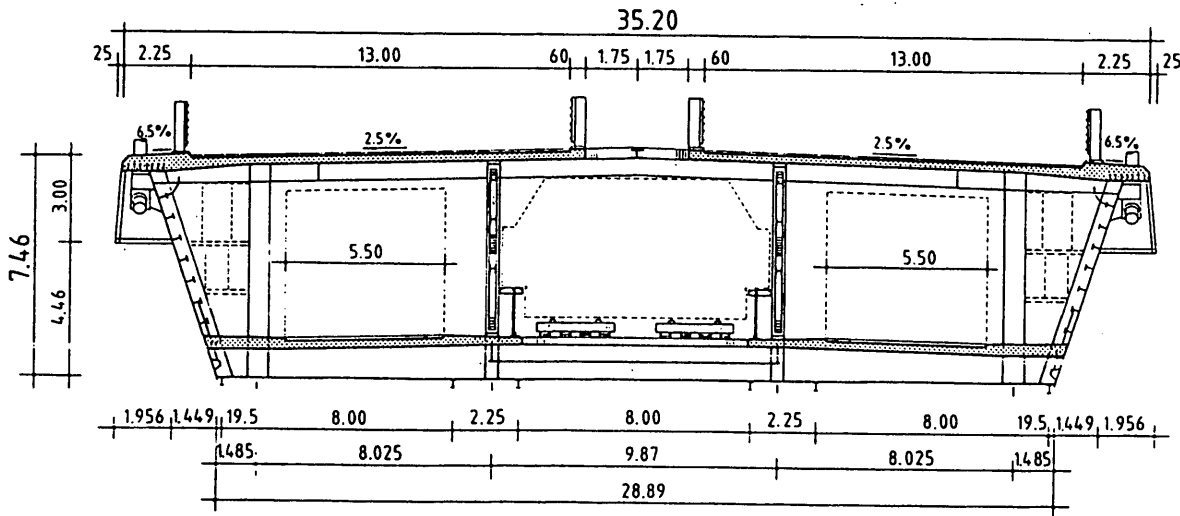
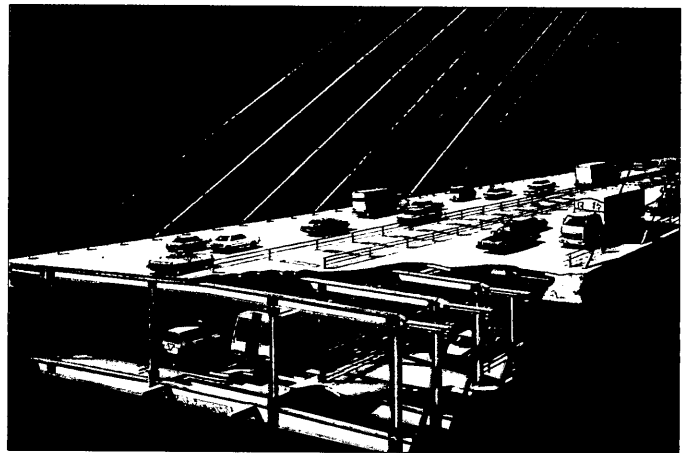


Figura 2.
Sección transversal de la luz principal,
a) Croquis,
b) Premontaje de los primeros tramos,
c) Impresión artística.



guración semiarpa, con distancias de sus anclajes de 8,7 m en la luz principal, 6,1 m en las luces laterales y 1,5 m en las torres.

La superestructura es una viga cajón trapezoidal con una altura de aproximadamente 8 m y un ancho de 35,2 m arriba y 29,0 m abajo. Es de hormigón pretensado en las luces laterales y en los primeros 21,425 m de la luz principal; y una estructura mixta en los 387,15 m centrales de la luz principal. Es fijo longitudinalmente en la torre Ma Wan y móvil en la torre Lantau y las demás pilas. Las torres, con forma de H, son de hormigón.

2.2 ESTRUCTURA COMPUESTA DE LA LUZ PRINCIPAL

2.2.1 Generalidades

La estructura mixta consiste básicamente de:

- ▼ Las almas inclinadas con los anclajes de los cables, con longitud de los elementos de 8,70 m.

Las almas, con espesor de 16 mm y 22 mm están rigidizadas longitudinalmente mediante 7 rigidizadores laminados de forma -I y un rigidizador trapezoidal y en el sentido vertical mediante rigidizadores soldados de forma -I a distancias de 4,35 m.

- ▼ Los marcos del tipo Vierendeel a distancias de 4,35 m
- ▼ Entramados longitudinales en correspondencia con los montantes internos de los marcos Vierendeel. Dichos entramados distribuyen las cargas útiles concentradas a varios marcos transversales y reducen, además, las vibraciones causadas por el tráfico. Para mantener las diagonales libres de solicitaciones debidas a la estructura principal, se han bulonado inmediatamente después de aplicar todas las cargas muertas.
- ▼ Vigas transversales secundarias como soporte de la estructura ferroviaria
- ▼ Las losas superior y inferior, Figura 2.

Elementos especiales se han necesitado en la transición a la superestructura de hormigón.

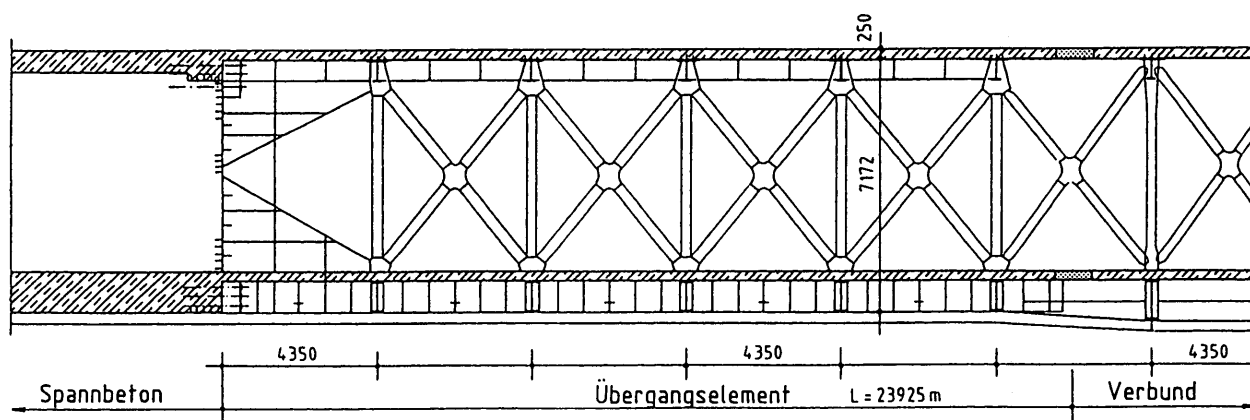


Figura 3. Elemento de transición, a) Croquis, b) Foto.

El acero es de calidad FE 510 según EN 10025 (1990), y donde resulta necesario las características transversales han sido garantizadas. Las uniones de la estructura metálica a realizar en obra se han hecho con tornillos de alta resistencia pretensados.

2.2.2 Elemento de transición (Pescante de avance)

El elemento de transición entre la superestructura mixta normal y la superestructura de hormigón sirvió durante el empuje acompasado de la superestructura de hormigón –ver más adelante– como pescante de avance, Figura 3. Se tuvo que diseñar entonces no solamente para el estado de servicio sino también para las reacciones de apoyo muy importantes y los grandes momentos de mensula durante el lanzado. Esto ha requerido básicamente los refuerzos siguientes:

- ▼ 1. La altura del cordón inferior del arriostramiento longitudinal tuvo que incrementarse de 550 mm a 850 mm y las diagonales de H 250 x 255 a H 430 x 325.
- ▼ 2. A una distancia de 650 mm del alma tuvo que preverse una viga longitudinal secundaria con altura de 700 mm. Dicha viga se elimina después del lanzamiento para dar acceso a la inspección de las soldaduras altamente solicitadas de las vigas transversales.
- ▼ 3. El elemento de transición está anclado a la estructura de hormigón con barras D & W Ø 36 m, St 108/123.

2.2.3 Losas superior y inferior

Las losas superior y inferior de espesor de 250 mm son de hormigón pretensado en la dirección longitudi-



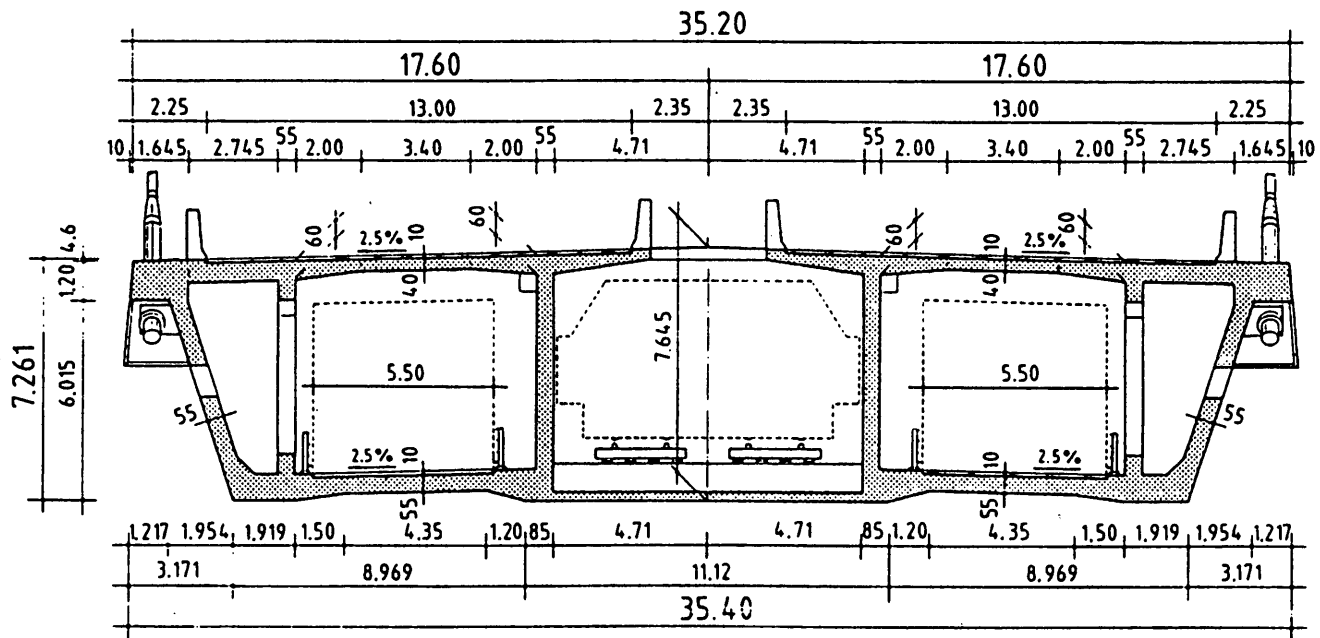


Figura 4. Sección transversal de las luces laterales, a) Croquis, b) Medio puente durante la construcción.

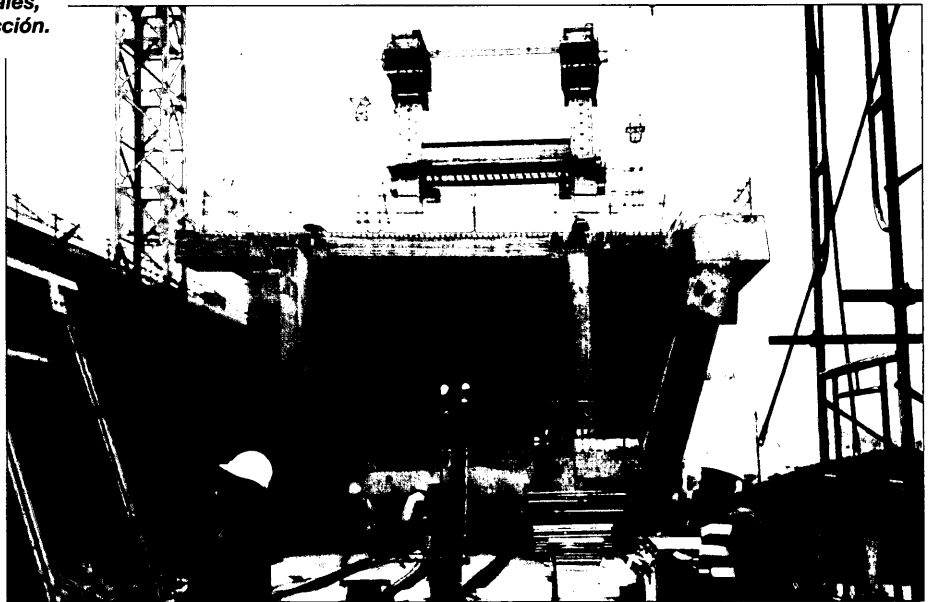
nal. En las cercanías de las almas el espesor está incrementado a 550 mm y 400 mm respectivamente. Ambas losas tienen aberturas relativamente grandes en la zona del ferrocarril suburbano para garantizar una ventilación suficiente en caso de un incendio. La acción compuesta entre las losas y las vigas principales y marcos transversales se logra mediante conectores perno de $\varnothing 22$ mm. Las juntas de obra, con longitud de 1,0 m, tienen armadura de solape.

2.3 SUPERESTRUCTURA DE HORMIGÓN PRETENSADO DE LAS LUCES LATERALES Y DE LA LUZ PRINCIPAL

2.3.1 Generalidades

La superestructura de hormigón pretensado es una viga cajón de 3 células, Figura 4. El espesor de la losa superior varía entre 350 mm y 600 mm, el de la losa inferior entre 300 mm y 1236 mm; las almas exteriores inclinadas e interiores verticales tienen un espesor de 550 (550 a 900) mm.

Debido al tráfico en el plano inferior, la rigidización transversal se logra solamente mediante acción de marco. También en las pilas ningún diafragma interior era posible, así que tuvieron que preverse vigas transversales por debajo de la superestructura.



Los esfuerzos verticales debidos al peso propio y a la carga móvil se consideran mas o menos uniformemente en todas las almas; los esfuerzos debido al la componente vertical de los esfuerzos de cables básicamente por las almas exteriores solamente.

El pretensado longitudinal con cordones de $\varnothing 0,6"$ St 167/186 está dimensionado por la construcción mediante empuje acompasado. Es entonces básicamente un pretensado centrado de $1,3 \text{ N/mm}^2$.

Las losas están pretensadas transversalmente y el alma inclinada, verticalmente, con cordones de $0,6"$ a distancias de 1 m.

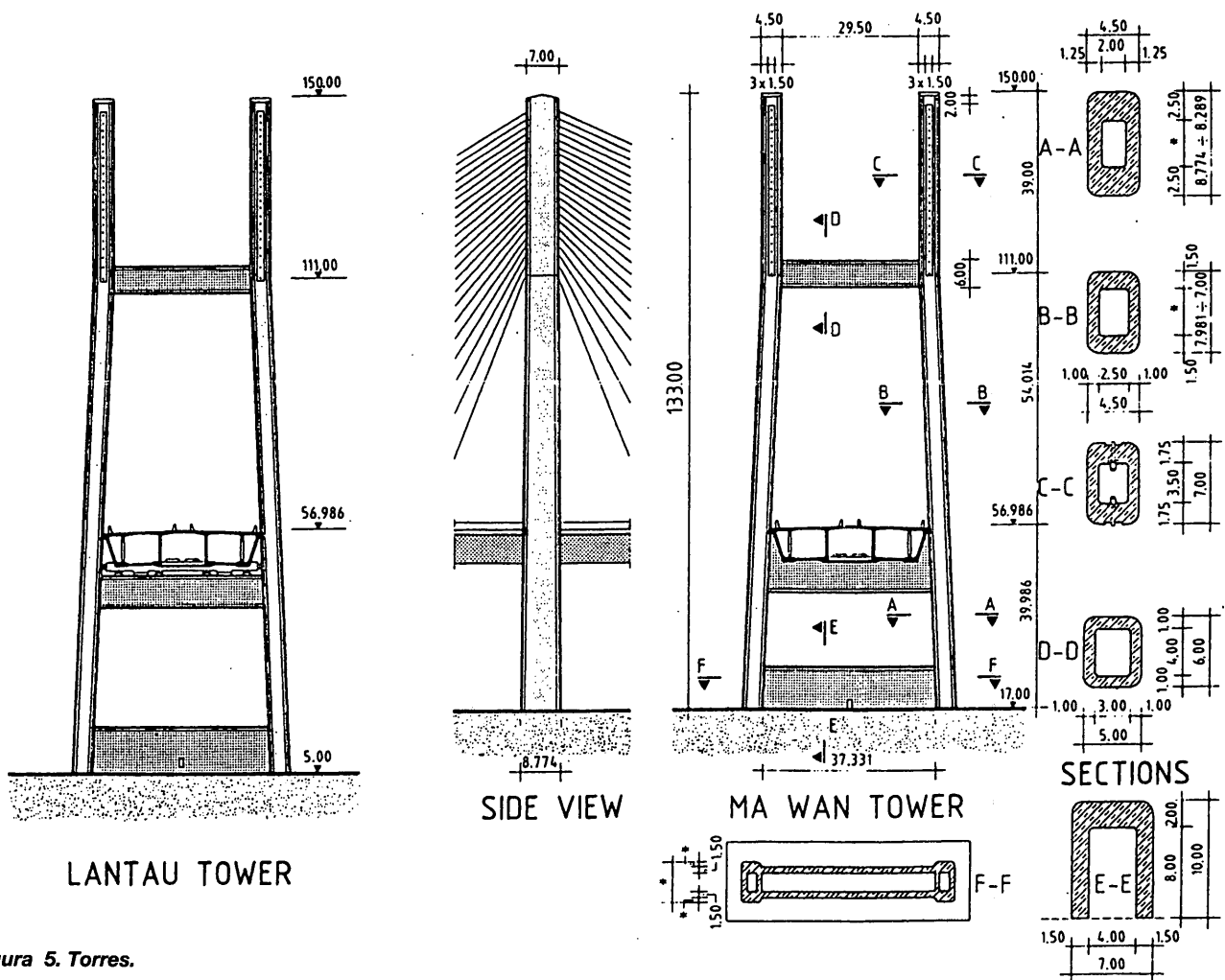


Figura 5. Torres.

Los cables están anclados a una viga con altura de 1,20 m con tubos metálicos y una chapa metálica gruesa. La componente vertical de los esfuerzos de los cables se recogen con tensores verticales de 7 a 12 cordones de 0,6", St 167/186, en las almas exteriores.

2.3.2 Apoyos

Todos los esfuerzos longitudinales están absorbidos por la torre Ma Wan. Aquí, la superestructura está monolíticamente conectada con la viga transversal por debajo del tablero.

En la torre Lantau, los esfuerzos verticales son absorbidos por apoyos encima de la viga transversal y esfuerzos transversales por apoyos entre las patas de la torre y el tablero superior e inferior respectivamente.

En las pilas intermedias y las pilas en los extremos, las reacciones positivas son resistidas por apoyos y las negativas por tres cables de anclaje en la cercanía de las almas ex-

ternas, que consisten en 68 (98) cordones Ø 0,6" St 167/187. Tienen la misma protección anticorrosiva y los mismos anclajes que los cables –ver más adelante–. Esfuerzos transversales se pueden transmitir solamente en las pilas de los extremos.

2.4 TORRES

2.4.1 Generalidades

Las torres consisten básicamente de:

- ▼ Las dos patas que son verticales, con una distancia igual a la distancia de los anclajes de los cables en la superestructura, en la zona de anclaje de los cables y ligeramente inclinadas en la parte inferior
- ▼ Tres vigas transversales, situadas en el quiebro de las patas, por debajo de la superestructura y por encima de las cimentaciones, Figura 5.

Figura 6. Pilas intermedias.

Las esquinas de las patas y de las vigas transversales tienen un redondeado de radio 1 m.

Las componentes horizontales de los esfuerzos de cables están recogidas mediante 2 tendones de 7 a 17 cordones $\varnothing$ 0,6", St 167/186.

2.4.2 Fundaciones

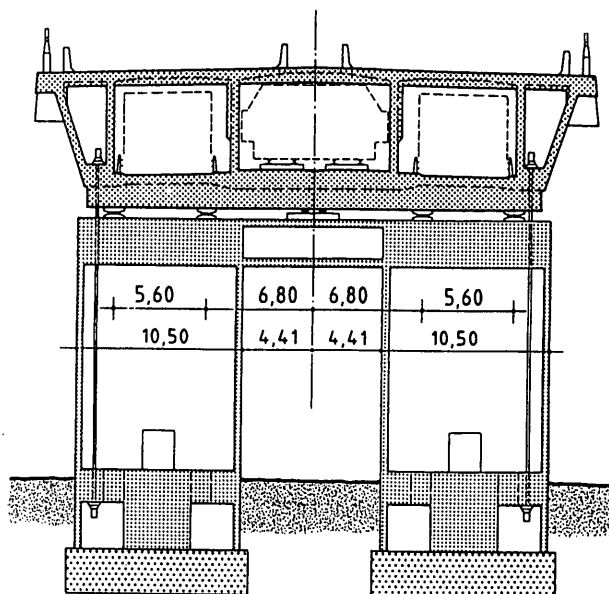
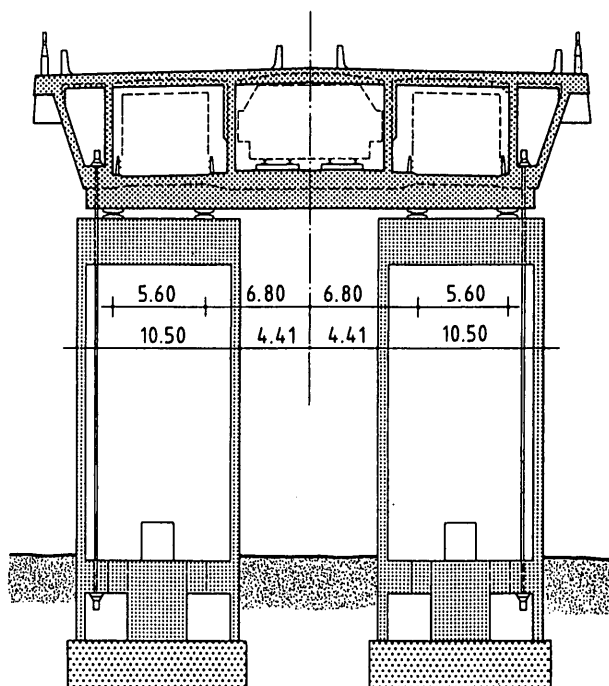
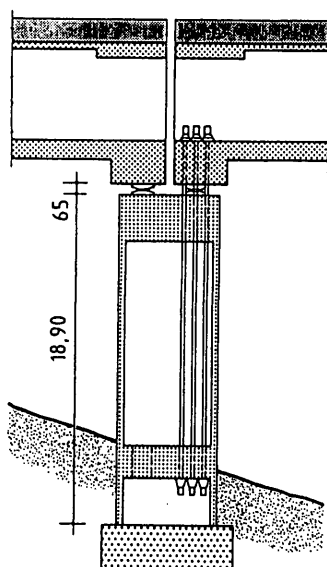
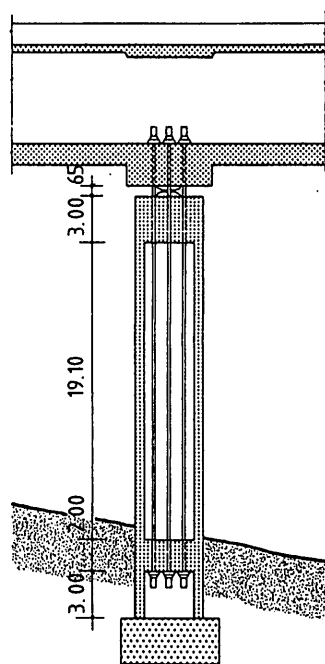
La torre Lantau está fundada a nivel de ± 0 m en roca competente, teniendo la losa de fundación dimensiones de 50,5 x 16 x 5 m.

La torre Ma Wan está fundada a nivel de +12,0 m sobre una losa de 51 x 18 x 5 m en combinación con dos cajones con $\varnothing$ 4 m, excavados a mano.

2.5 PILAS DE ANCLAJE

Las pilas de anclaje son pilas de hormigón vacías con esquinas redondas y están fundadas directamente sobre roca competente. Los 3 cables se anclan lo más bajo posible, quiere decir directamente sobre la fundación.

Las pilas intermedias 2 y 5 son independientes, Figura 6. Las pilas 1 y 6 en los extremos que soportan –además del puente Kap Shui Mun– también una luz de transición y la luz final del viaducto Ma Wan, son marcos, Figura 7.

**Figura 7. Pilas en los extremos.**

2.6 CABLES

Los cables consisten de 51 a 102 cordones $\varnothing$ 0,6" paralelos, con una resistencia a rotura de 172 N/mm² después del

Figura 8. Cables, a) Sección de los cables, b) Cabezas de anclaje.

galvanizado. La protección anticorrosiva consiste de un galvanizado a fuego con 280 g/m^2 , una grasa inhibidora a la corrosión y una tubo PE con espesor de 1 mm. Adicionalmente, los cables completos están incluidos en un tubo de polietileno, Figura 8.

Los cordones están anclados en cabezas. Las cargas permanentes se toman mediante cuñas con alta resistencia a la fatiga, las cargas útiles mediante una combinación de dichas cuñas y una resina epoxi.

El anclaje fijo se halla en las torres y el anclaje móvil en la superestructura. Los cordones se han montado individualmente y tesado inicialmente con un gato del tipo monocordón hasta tener la misma catenaria. Después, los cables completos se han tesado por medio de un gato hidráulico calibrado con una capacidad de 1500 toneladas, Figura 9.

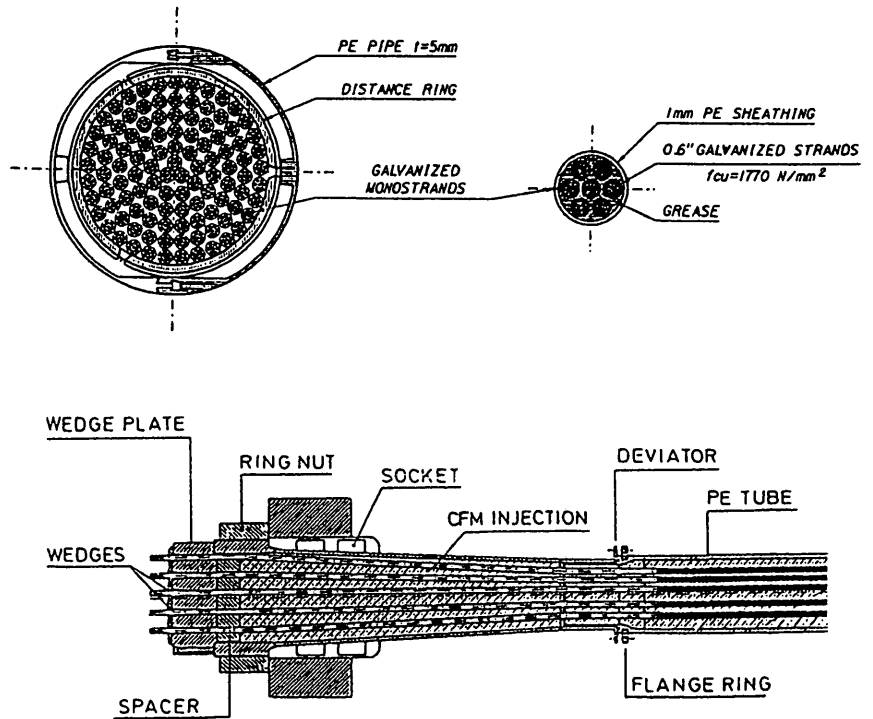
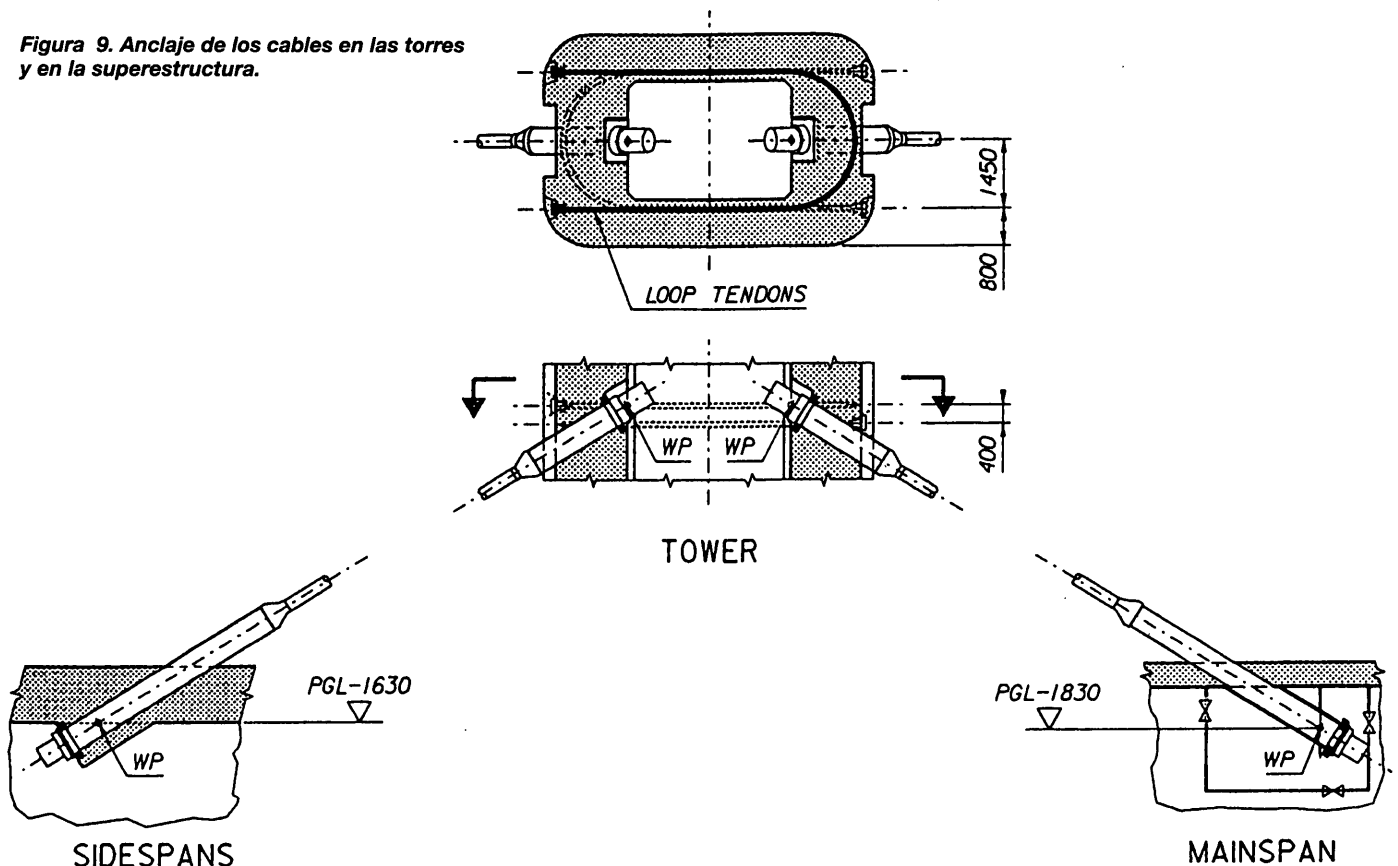


Figura 9. Anclaje de los cables en las torres y en la superestructura.



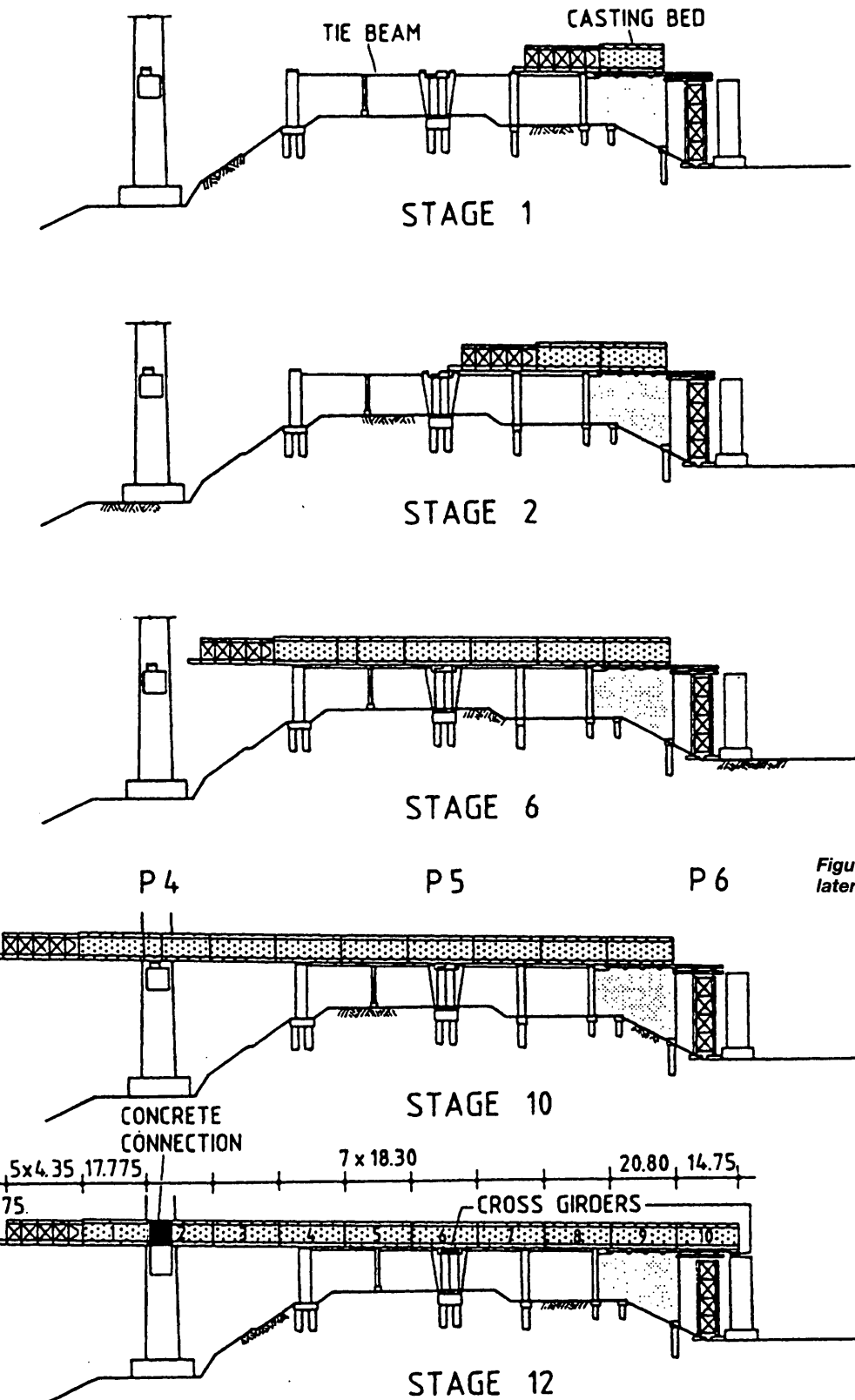


Figura 10. Empuje acompasado de la luces laterales Ma Wan, a) Esquema, b) Vista panorámica.

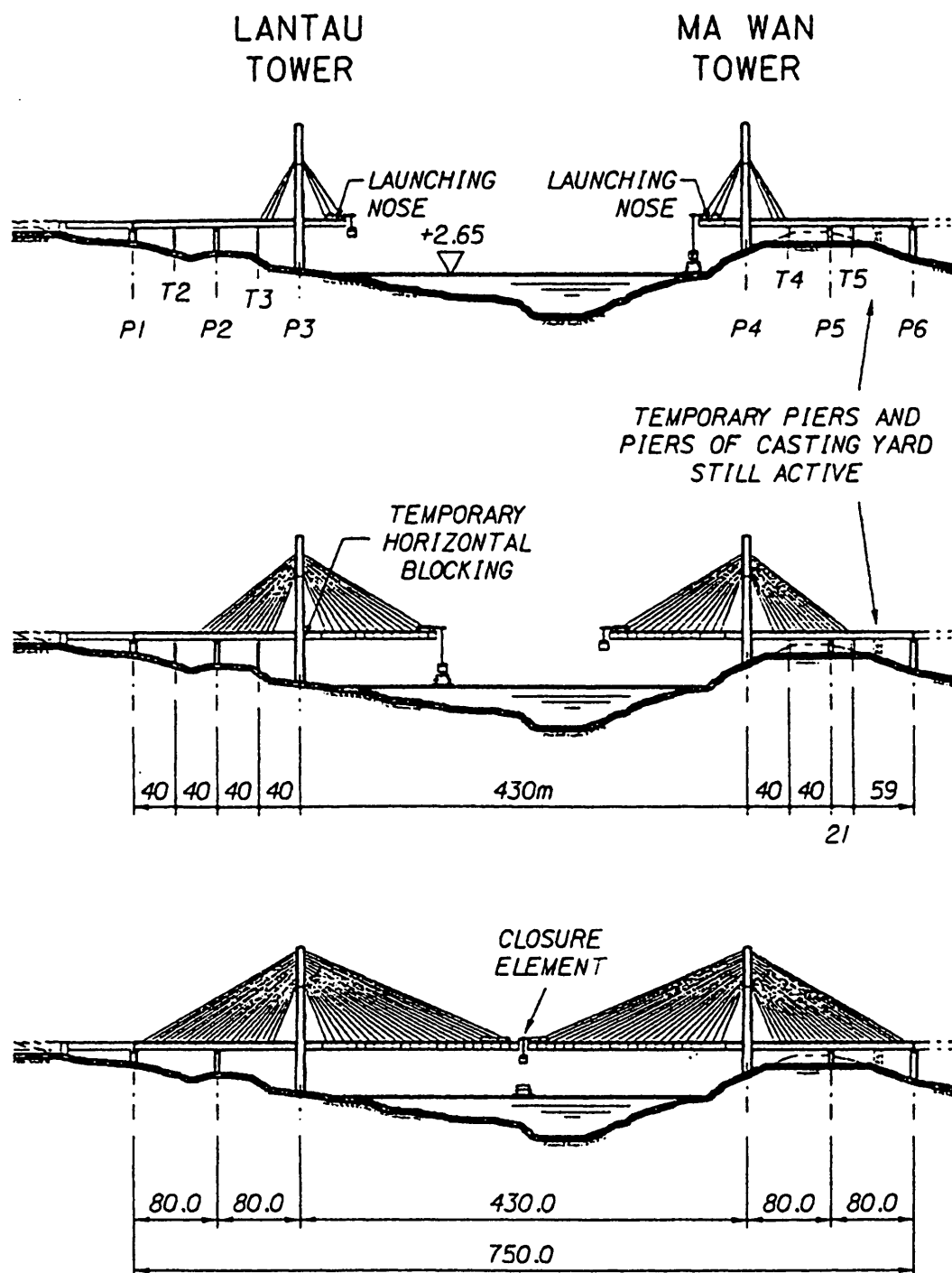
3. CONSTRUCCIÓN

3.1 GENERALIDADES

El tiempo total de construcción, entre la adjudicación del contrato el 16 noviembre 1992 y la abertura al tráfico el 18 Mayo 1997, fue de 54 meses.

3.2 LUCES LATERALES

Las luces laterales han sido construidos mediante el proceso del empuje acompasado, con una longitud de los elementos de 18,30 m, Figura 10. Las vigas transversales bajo la superestructura tuvieron que



construirse por tanto, en un segundo paso después de haber alcanzado la posición final de la superestructura.

Para mantener los procesos y los equipos dentro de los límites bien conocidos, ambas luces laterales se han empujado en dos mitades, pero más o menos simultáneamente.

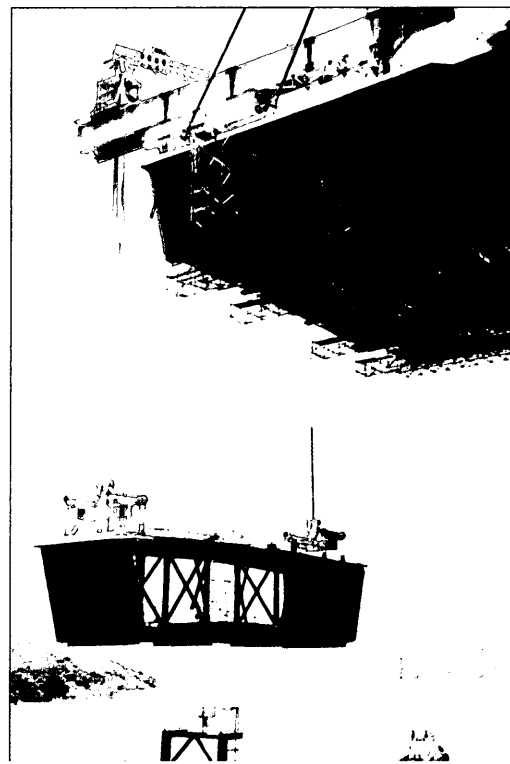
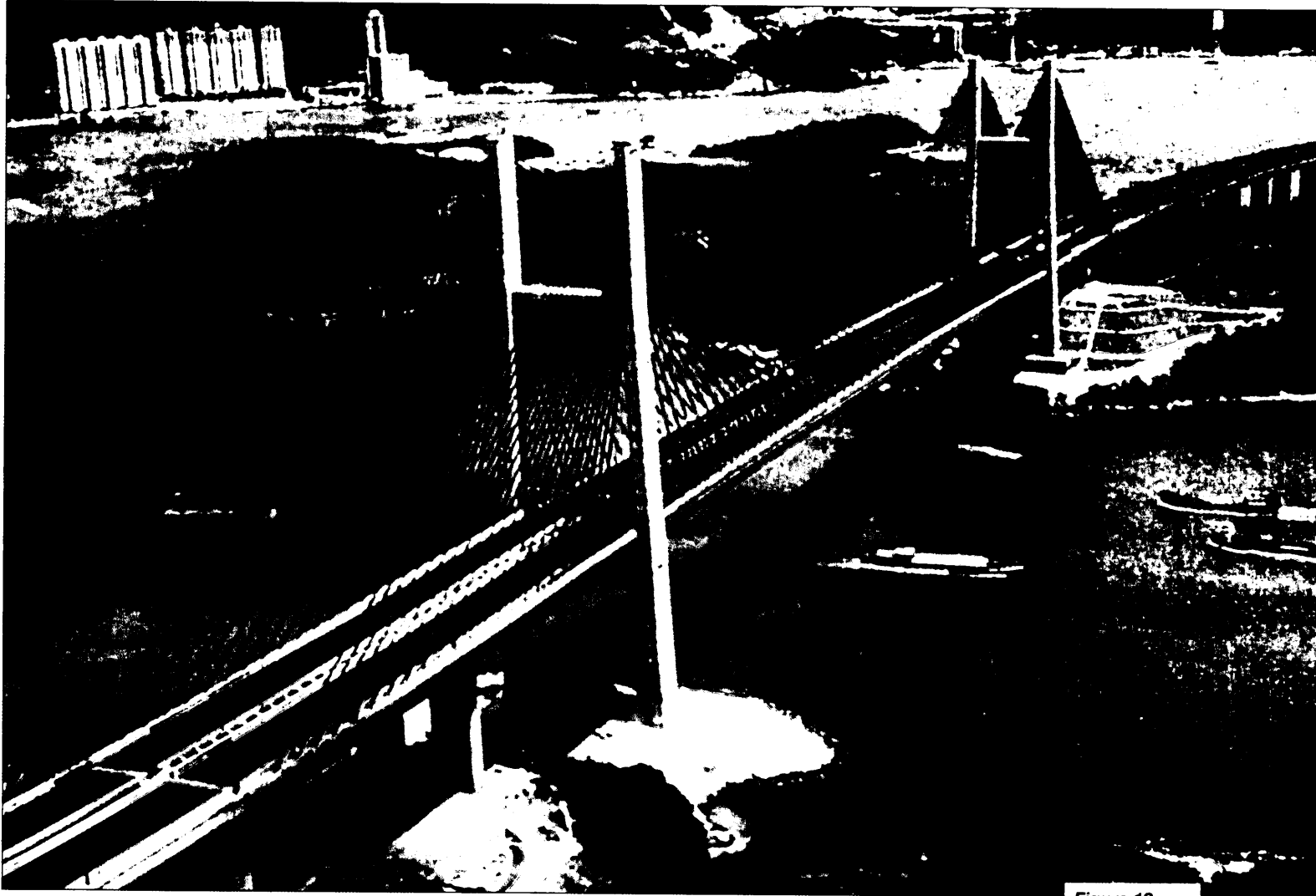


Figura 11. Montaje de la luz principal, a) Esquema, b) Izaje de un elemento de 500 t.

El pescante de avance está formado por los primeros tres elementos de la estructura compuesta, con diseño especial, ver punto 2.2.2, ya que las aguas poco profundas por debajo de dichos elementos no permitieron el transporte de los elementos por barco. El cordón inferior se ha lanzado conjuntamente con la estructura metálica, el cordón superior en cambio se ha hormigonado después del tesado de los primeros tres cables. Para permitir el pasaje del anclaje de dichos cables por la torre, fue necesaria una abertura temporal de las patas de las torres.

3.3 LUZ PRINCIPAL

La estructura mixta de la luz principal ha sido montado con el proceso de ménsula libre, simultáneamente desde ambas torres, Figura 11. Los elementos individuales se han montado conjuntamente con sus losas, lo que daba un peso a izar de 500 toneladas. El equipo de izaje, fabricado a medida, consistió básicamente en dos vigas principales y dos vigas transversales y tenía un peso de 390 toneladas.



4. PARTICIPANTES PRINCIPALES

El puente terminado proporciona una unión interesante a su entorno más bien rural, Figura 12.

La propiedad del puente es el Hong Kong Department of Highways; el ingeniero director fue Mott MacDonald Far East, Hong Kong.

El puente ha sido diseñado por Greiner International Ltd., Tampa, USA, Leonhardt, Andrä und Partner GmbH, Stuttgart, Alemania, Fugro Hong Kong Ltd., Hong Kong, J. Roger Preston & Partners, Hong Kong y Kennedy & Donkin Transportation Ltd., Hong Kong, para el consorcio Kumagai Gumi/Maeda/Yokogawa/Hitachi Zosen.

El diseño ha sido controlado por Mott MacDonald Far East, Hong Kong; Flint & Neill Partnership, London, para la estructura metálica y Harris and Sutherland, Hong Kong para la estructura de hormigón.

Los cables han sido fabricados por DSI, München, Alemania. ●



Figura 12.
El puente terminado,
a) de día,
b) de noche.