

Torres del Puente Stonecutters

El Puente Stonecutters, en Hong Kong, tiene una estructura atirantada con una longitud total de 1,595 m y un claro principal de 1,018 m. Inaugurado a finales del 2009, el puente cruza el Canal Rambler y es considerado como la entrada principal del concurrido Puerto de Contenedores Kwai Chung. Esta estructura puede observarse desde muchos lugares de la Isla de Hong Kong y Kowloon. Las características más sobresalientes del puente son las dos torres gemelas cónicas simples que soportan la carpeta de rodamiento de 50 m de ancho. Estas torres conformes se erigen 295 m sobre el nivel del mar; las secciones más bajas son de concreto armado mientras que los últimos 115 m son de una sección compuesta, con un núcleo de concreto armado y un recubrimiento en acero inoxidable.

Selección del Material



Figura 1: Vista general del Puente Stonecutters

La vida útil del puente es de 120 años. Se requirió de un material altamente durable para las secciones superiores de las torres del puente debido a la severidad del ambiente marino y a la contaminación ambiental. Adicionalmente, el mantenimiento de las torres posterior a la construcción será extremadamente difícil debido al tráfico en tiempo real. El acero inoxidable fue seleccionado para el revestimiento de la sección compuesta de la parte superior de las torres por su durabilidad y atractiva apariencia. El acero al carbono hubiese requerido de recubrimientos protectores que hubiesen tenido que ser reemplazados en un estimado de 25 a 30 años.

Inicialmente se tenían considerados a los aceros inoxidables austeníticos estándares con molibdeno pero fueron descartados debido a su relativamente baja resistencia de diseño (220 N/mm^2), y a la incertidumbre sobre su resistencia a la corrosión dada la rugosidad del acabado superficial deseado. Aleaciones austeníticas superiores con mejor resistencia a la corrosión, por ejemplo el tipo 1.4539 (N08904) y el grado 1.4439 (S31726), no fueron consideradas en detalle ya que no cumplían con los requisitos de costo, disponibilidad y resistencia. El acero inoxidable dúplex 1.4462 (2205) fue el material elegido dada su elevada resistencia (460 N/mm^2) combinada con una buena resistencia a la corrosión y tolerancia en el acabado superficial.



Figura 2: Torre y tirantes

Se especificó un acabado superficial pulido 1K (como se define en el estándar EN 10088 parte 2 [1]) para todas las superficies expuestas, con una rugosidad superficial promedio de $0.5 \mu\text{m}$. Se creó una apariencia ligeramente texturizada no direccional poco reflectiva al granallar la superficie con una mezcla de óxido de aluminio y perlas de vidrio.

Diseño

El diseño inicial de los 115 m superiores de las torres consideró una sección totalmente hecha en acero estructural. Sin embargo, se sabe que las torres circulares son propensas a la vibración generada por remolinos. Una investigación mostró que las frecuencias de las oscilaciones laterales en la cima de esta torre coinciden con las frecuencias naturales de los tirantes; esto significa que la vibración de los cables debido a la resonancia lineal fue posible.

Para evitar lo anterior, el diseño de la parte superior de la torre fue cambiado a una estructura compuesta por una coraza en acero inoxidable alrededor de un núcleo de concreto armado anular que cubre la caja de anclaje de los cables. Esta forma estructural mostró una mejor respuesta a la generación de remolinos dada su mayor masa, rigidez y amortiguamiento.

La coraza de la torres se compone de 32 segmentos de acero inoxidable (Figura 3), cada uno con placa de 20 mm de espesor y altura variable que va desde los 5.6 a los 3.2 m. El diámetro de la sección circular va disminuyendo (en forma de cono) de 10.9 m a 7.2 m conforme el espesor de la pared de concreto se reduce de 1.4 m a 0.8 m. Los 3 conjuntos de tirantes inferiores están anclados dentro del concreto armado de la sección más baja de la torre. Por encima de esta hay 25 cajas de anclaje de acero dentro de las cuales los restantes 25 juegos de tirantes están instalados. En la parte superior de cada torre, se dejó un espacio para en un futuro instalar amortiguadores de péndulo de masa, por si éstos fueran requeridos para mitigar la vibración de las torres.

La capacidad estructural de la sección superior de la torre se basa en la acción compuesta entre la coraza de acero inoxidable, el núcleo de concreto y las cajas de anclaje. Los conectores de corte de acero inoxidable dúplex (Figuras 5 y 6), de 16 mm de diámetro y hasta 300 mm de longitud, transfieren la carga entre el concreto y la coraza o la caja de anclaje. La cantidad de conectores está determinada por la necesidad de garantizar la transferencia de todas las cargas a corto y largo plazo entre la coraza y la pared de concreto. Los conectores están uniformemente distribuidos aproximadamente cada 300 mm entre centros para evitar abolladuras en la coraza y en las placas de las cajas de anclaje antes de que se alcance el límite elástico. Se pudieron haber especificado pernos de acero al carbono ya que éstos pueden soldarse al acero inoxidable dúplex; no se consideró que existiera riesgo de corrosión galvánica o bimetalica en este caso ya que ambos aceros estaban ahogados en el concreto [2]. No obstante, los pernos de acero inoxidable dúplex eran más resistentes.

Una sección prototipo de la coraza de acero inoxidable fue fabricada antes de que comenzara la construcción con la idea de desarrollar los procedimientos adecuados de soldadura. Una gama de técnicas de fabricación para lograr un ajuste adecuado y orientación entre las superficies de contacto también se estudiaron en el prototipo, junto con una investigación sobre cómo el acabado de alta calidad requerido podría obtenerse y qué tan fácil podría ser reintegrado.



Figura 3: Segmento de la coraza en acero inoxidable



Figura 4: El puente en construcción



Figura 5: Conectores de corte en el interior de una sección de la torre



Figura 6: Conexión de los bordes de las pestañas

Para facilitar la elevación, cada segmento de la coraza de acero inoxidable fue fabricado en dos mitades, con bridas de refuerzo de 25 mm de espesor y anillos intermedios de refuerzo de 25 mm de espesor. Pernos de agarre de alta resistencia a la fricción de 22 mm de diámetro en acero inoxidable dúplex fueron utilizados para los ensambles verticales. La superficie de contacto de las placas conectoras requirió de un tratamiento para garantizar que el coeficiente de fricción fuera mayor a 0.2. Los pernos fueron pre-tensionados para obtener una tensión del vástago de 165 kN. No se permitió ningún deslizamiento de servicio, pero se le permitió deslizarse en el estado del límite máximo, con las cargas aplicadas restantes contenidas en la orientación.

Los ensambles horizontales se asumen efectivos para resistir las fuerzas de compresión vertical solamente, sin esfuerzos de corte que se transfieran. Dado que la altura de los segmentos individuales de la coraza de acero inoxidable es pequeña con respecto al diámetro de la sección total, tales secciones individuales actúan efectivamente como anillos horizontales restrictivos del núcleo interno. Por lo tanto, se asume que la coraza de acero inoxidable únicamente resiste esfuerzos directos en las direcciones horizontal y vertical, no de corte o de torsión. La coraza, sin embargo, contribuye a la resistencia al esfuerzo de corte de la sección ya que actúa como supresor de tensión similar a los anillos de refuerzo (o articulaciones). El diseño de la placa de la coraza se llevó a cabo de tal manera que los esfuerzos calculados satisfacen el criterio de cedencia de Von Mises. El espaciamiento entre los conectores de corte fue gobernado por la transferencia de corte entre la coraza y el concreto; la separación resultante fue tal que la cubierta cede en compresión en vez de pandearse.

La unión entre la coraza y las placas de las bridas fue una conexión estructural crítica ya que se necesitaba de un ajuste muy cerrado de las superficies de contacto (diferencia máxima de 0.25 mm de más del 60% del área de contacto). Para cumplir con este requerimiento, el maquinado de los bordes de las pestañas habría sido un proceso extremadamente largo y la enorme cantidad de soldadura en la obra requerida habría sido muy difícil de controlar y hubiese ocasionado distorsión. La solución fue unir los bordes con pernos y el uso de un alto volumen de metal de aporte desnudo mediante el proceso de arco metálico manual. Las placas se colocaron en posición, las pestañas de las placas fueron unidas con los pernos y fueron soldadas en secuencia. Se encontró que, si bien este método no elimina la distorsión del todo, se reduce significativamente el tamaño de la separación y se incrementa el área de contacto dentro de los límites del código de diseño.

Fabricación y Montaje

Fabricación: Para los segmentos medios típicos, cuatro placas planas fueron unidas empleando soldadura a tope de elevada resistencia para posteriormente ser roladas para dar la forma correcta. Sin embargo, para las cuatro primeras secciones de la coraza, cuya altura es de 5.6 m, las placas fueron roladas para obtener la curvatura deseada y posteriormente fueron soldadas debido a las limitantes en ancho del equipo para rolar.

Los trabajos de fabricación se rigieron bajo el estándar BS 5400-6, cláusulas 4.1 a 4.16, con excepción de lo establecido en las cláusulas 18.44 a 18.52 [3]. Toda la herramienta y equipo de proceso utilizados fueron empleados solamente para trabajar el acero inoxidable y no estuvieron en contacto con otros materiales metálicos a fin de prevenir contaminación.

Montaje: La coraza y las cajas de anclaje fueron utilizadas como ahogado permanente en el concreto. Para el montaje de la coraza y los segmentos de las cajas de anclaje se avanzó en dos ciclos completos antes del concreto. Los accesorios temporales necesarios para el manejo y montaje de los componentes de acero inoxidable fueron hechos con el mismo grado de acero inoxidable de la estructura. Tales accesorios fueron colocados en lugares que no fueran visibles en la estructura terminada, y en donde esto no fue posible, el acabado superficial del acero inoxidable fue restaurado después de remover el accesorio temporal.

Soldadura: Se adoptó la guía del IMOA para la soldadura de aceros inoxidables dúplex [4]. Los consumibles usados para la soldadura por arco eléctrico de acero inoxidable fueron seleccionados de tal modo que se garantizara que las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión del metal soldado no fueran inferiores a las del metal base. Los soldadores se calificaron de acuerdo con la norma EN 287 [5] y los procedimientos de soldadura se calificaron según los estándares europeos vigentes de soldadura. Las áreas soldadas fueron granalladas para mantener la uniformidad del acabado superficial



Figure 7: Instalación de los segmentos de la coraza de acero inoxidable.

La información para este caso de estudio fue amablemente proporcionada por Arup

Referencias y Bibliografía

- [1] EN 10088-2:2005 Stainless steels. Technical delivery conditions for sheet/plate and strip of corrosion resisting steels for general purposes
- [2] Stainless steel in contact with other metallic materials. Materials and Applications Series, Volume 10, Euro Inox, 2009
- [3] BS 5400-6:1999 Steel, concrete and composite bridges. Specification for materials and workmanship, steel
- [4] Practical guidelines for the fabrication of duplex stainless steels. International Molybdenum Association, 2001 (*new Edition 2009*)
- [5] EN 287-1:2004 Qualification test of welders - Fusion welding. Steels

Centro de Información en línea para el acero inoxidable en construcción: www.stainlessconstruction.com

Obtención de Detalles

Cliente:	Hong Kong Highways Department
Diseñador:	Arup
Ingeniería Civil y Estructural:	Arup
Contratista principal:	Maeda-Hitachi-Yogogawa-Hsin Chong Joint Venture (MHYHJV)
Lugar de fabricación:	Zhongshan, Guangdong province, China

Esta serie de Casos de Estudio de Acero Inoxidable Estructural es auspiciada por Team Stainless.

Translated by:

