

Diseño y construcción del tercer juego de esclusas del canal de Panamá



José Peláez

Ingeniero industrial y MBA executive internacional por EOI.

En Sacyr desde 1993

Resumen

El canal de Panamá es una de esas maravillas que te envuelven desde que tomas contacto. Una obra de tal magnitud y carga simbólica invita a reflexionar sobre qué motivos han llevado a la humanidad a retar a la naturaleza con tanta determinación, hasta el punto de conectar los océanos Atlántico y Pacífico mediante una vía acuática. También sobre el proceso interior por el que cada uno de los que participamos hemos pasado. Finalmente, merece la pena reflexionar sobre el impacto que tiene esta magnífica obra civil en la vida alrededor del mundo y entender cómo funciona y por qué es necesario ampliarlo.

El artículo aborda, de forma breve, la historia y los grupos de interés relacionados, para ponernos en antecedentes en relación con el significado del canal de Panamá. Finalmente, se centra en los procesos de diseño, construcción y puesta en marcha (figura 1). Por último, destaca las importantes innovaciones desarrolladas a lo largo de todo el proyecto.

Palabras clave

Canal, hormigón, planificación, innovación

Abstract

The Panama Canal is a wonder that involve you from your first contact. A big magnitude and symbol work that invite you to reflect about reason that push humanity to challenge the nature whit determination, to connect the Atlantic Ocean to Pacific Ocean. So about the interior process the people that participate. Lastly, it worths to reflect about the impact this magnificent work has over life around the World and to understand how it works and why we need to extend it.

This paper approachs, on brief words, the history and the related interest groups, to put us on record with the Panama Canal meaning. Lastly, it focus in desing process, construction, and start up. Finally, it highlights the important innovations developed in this project.

Keywords

Canal, concrete, planning, innovation



Fig. 1. Renderizado del tercer juego de esclusas del lado del Pacífico

Historia

La idea de una vía interoceánica se concibe ya desde la llegada de los españoles a América: con las primeras expediciones del siglo XV se abre el Camino de Cruces, que comunica las costas del Atlántico y el Pacífico, aprovechando el cauce del río Chagres. El primer impulsor de la vía acuática en Panamá fue el rey Carlos I de España. Se desarrollan entonces diseños básicos pero finalmente no se concreta debido al insuficiente desarrollo tecnológico de la época para emprender una empresa semejante.

Durante el siglo XIX se emprenden distintas expediciones en el istmo, explorando un gran abanico de alternativas de paso, desde Guatemala al Darién. Las expediciones fueron impulsadas por distintos grupos de interés y estados, con

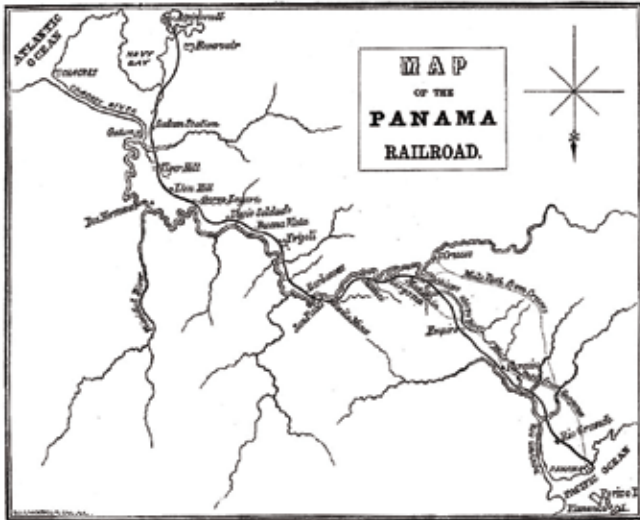


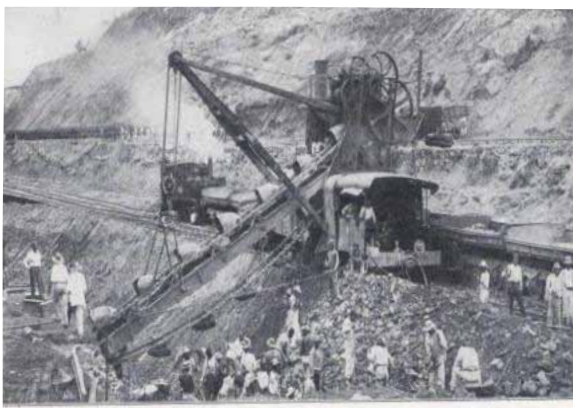
Fig. 2. Mapa del trazado del ferrocarril

diversas intenciones, desde el enfoque meramente comercial, hasta el geopolítico o el geoestratégico. Otro hito importante es la construcción del ferrocarril transoceánico a mediados del siglo XIX que aún está operando y que fue clave en la construcción del canal (figura 2).

La Compagnie Universelle del Canal de Panamá, fundada por el diplomático Ferdinand de Lesseps, es la empresa que finalmente consigue la concesión del gobierno colombiano, concesión Wyse, para la construcción y explotación de la vía interoceánica (figura 3). De este modo, se inicia

en 1880 la construcción del proyecto de Lesseps que era hacer un canal al mismo nivel que los océanos, como el que el propio de Lesseps había hecho en Suez. El intento francés finalmente fracasa, fundamentalmente, por tres razones: la concepción de la obra, como un canal a nivel, tropieza con la topografía y la geología de Panamá. El punto de más elevación en la divisoria de aguas entre las vertientes atlántica y pacífica es el cerro Culebra, que se eleva algo más de 160 metros sobre el nivel del mar y cuya formación geológica es de origen volcánico, con materiales cambiantes y muy mezclados. La segunda causa es el clima tropical que, con elevada temperatura y humedad, es propicio para el contagio de enfermedades como la malaria y la fiebre amarilla. En este sentido, hay que considerar que a finales del siglo XIX no se tenía conocimiento del origen o el tratamiento de estas enfermedades, por lo que provocaron decenas de miles de víctimas. La tercera causa radica en los problemas financieros: las grandes desviaciones del presupuesto del proyecto y la estructura financiera que le daba soporte terminan finalmente por hacer inviable la obra.

Ya a principios del siglo XX, Estados Unidos empieza a ser un actor importante en el mundo y la construcción de una obra de esta envergadura genera tremendas fortalezas geopolíticas para posicionarse como una potencia. En efecto, la unión de las costas este y oeste de Estados Unidos es, sin duda, una mejora geoestratégica; además, el desarrollo de esta obra, situaba al país al frente de los avances tecnológicos mundiales. Pocos días después de



A French excavator opening a pioneer trench in the south end of the Cut. This was the best known method of excavating in that day.



The Cut in French times, showing their cableway plan of excavation. These cableways carried the material out of the canal and deposited it to one side, but unfortunately not far enough, for much of it has slid back into the Cut, causing extra excavation.

Fig. 3. Excavaciones en la etapa francesa

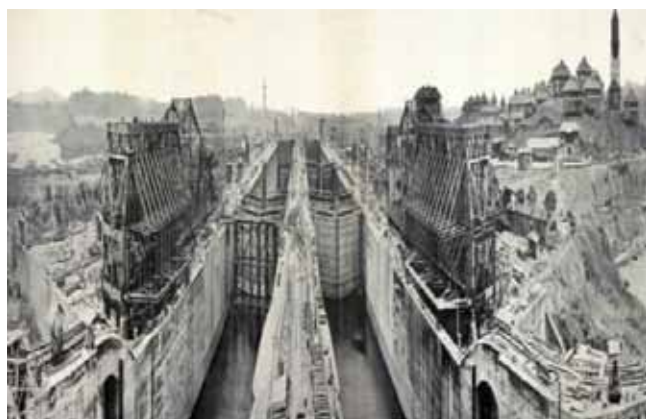


Fig. 4. Etapa de construcción estadounidense. Excavaciones y construcción de esclusas

la independencia de Panamá de Colombia, Estados Unidos adquiere la concesión de la empresa francesa para realizar el canal de Panamá y renueva con el nuevo país acuerdos más ventajosos para la explotación de la vía con una concesión a perpetuidad.

En 1904, el ingeniero civil John F. Wallace inicia la construcción del canal de Panamá, manteniendo el mismo concepto que De Lesseps, un canal a nivel; retoma los diseños de la empresa francesa e inicia la recuperación de las infraestructuras auxiliares y de la maquinaria. Sin embargo, en 1905 Wallace deja el proyecto y retoma la obra John Frank Stevens, un reconocido ingeniero civil con amplia trayectoria en obras ferroviarias tan importantes como la línea interoceánica estadounidense, aunque sin experiencia en hidráulica. La participación de Stevens en el proyecto es clave, ya que consigue resolver dos de las causas que hicieron fallar a los franceses: plantea un

canal con esclusas, mediante un lago elevado 26 m sobre el nivel del mar, aprovechando el cauce del río Chagres (figura 4), y da al Dr. Gorgas la suficiente autonomía para que aplique sus teorías en cuanto a las enfermedades tropicales, llegando a la conclusión de que el trasmisor es el mosquito y enfocándose en la eliminación del mismo. En la tercera causa del fallo francés se aplica el gobierno norteamericano, declarando la obra de interés nacional y aportando los recursos necesarios para llevarla a cabo. Stevens deja el proyecto en 1907 y el presidente Roosevelt decide que debe ser un militar, por su compromiso con el interés nacional y su sentido del deber, quien le sustituya en el cargo. De este modo, George Washington Goethals, ingeniero civil militar, continúa el plan trazado por su antecesor, incorporando para ello hasta 6.000 norteamericanos y más de 40.000 personas del resto del mundo para, finalmente, en agosto de 1914, poner en marcha la maravilla del canal de Panamá.

Grupos de interés - referéndum para la ampliación

El impulsor principal es el pueblo panameño, que mediante referéndum celebrado en 2006 decide su ampliación en 2006. El canal es para Panamá el motor más importante de su economía; no obstante, y previamente, para que el referéndum pudiera celebrarse, tanto los responsables de la administración del canal como los distintos gobiernos panameños, hicieron el trabajo de investigación necesario para concluir, si se ampliaba, cómo debía llevarse a cabo.

Las empresas navieras que utilizan el canal han tenido un rol fundamental. Así, además de la evidente evolución a barcos de mayor capacidad, han aportado información de la futura evolución de la industria naviera y de las nuevas necesidades por tipo de buques que se están generando.

Los gestores de puertos relacionados, principalmente puertos de las costas este y oeste de Estados Unidos, mediante la junta asesora del canal de Panamá, han podido aportar información del tamaño de buques que pueden alojar sus instalaciones, qué demanda de buques mayores tienen y, en consecuencia, qué planes de ampliación tenían.

Otros nuevos agentes del comercio son las plataformas logísticas de gran capacidad para intercambio de mer-

cancías, la zona libre de Colón en Panamá o la plataforma que lleva a cabo Maersk en Limón (Costa Rica); son plataformas impulsadas y usadas por grandes fabricantes de bienes de consumo y empresas de transporte y distribución a lo ancho del mundo y que se usan como grandes depósitos de *stock* intermedios.

La globalización y deslocalización de factorías ha provocado el progresivo desplazamiento de los centros de producción a Asia, principalmente, lo que genera la necesidad de mover grandes cantidades de bienes procesados hacia los lugares de consumo: las grandes empresas textiles, de componentes electrónicos, vehículos, etc. están distantes de los grandes centros de consumo, como son Estados Unidos y Europa (figura 5).

Las nuevas técnicas de extracción de combustibles fósiles, como el gas, han desarrollado nuevos centros de producción y nuevos modos de transporte. Así, empresas de gas exportan sus combustibles mediante grandes embarcaciones de transporte de gas licuado.

Diseño

El tercer juego de esclusas del canal de Panamá tiene varios caminos despejados desde el punto de vista de definición de la infraestructura posible y necesaria. No



Fig. 5. Flujos de bienes a través del canal de Panamá

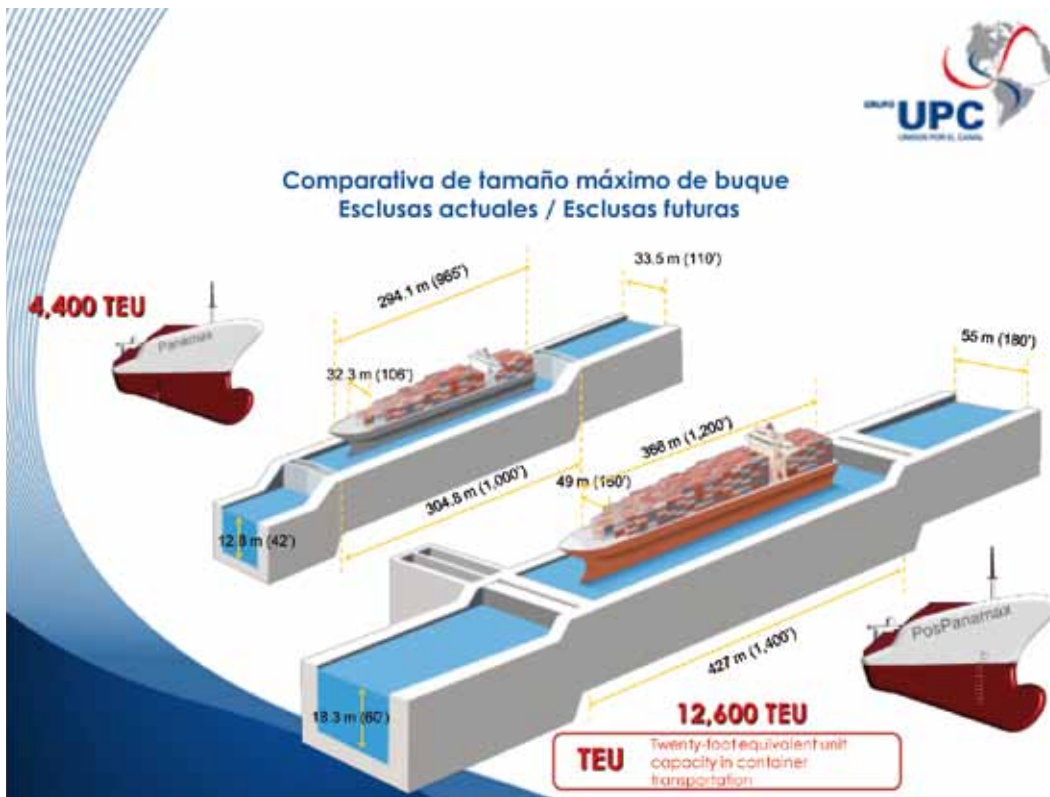


Fig. 6. Comparativa de tamaño de las esclusas actuales y las nuevas

hay discusión sobre si es a nivel del mar o no, y no existe discusión sobre la elevación del canal de navegación. Despejados pues estos dos grandes aspectos, el diseño se centra en definir el tamaño máximo de los buques que podrán usarlo, dato este obtenido en el proceso de documentación con los grupos de interés.

El tamaño de la esclusa es definido por la embarcación máxima y por el sistema de centrado, sujeción y traslado de los barcos dentro de las nuevas esclusas (figura 6). Así, se decide que el tránsito será asistido por remolcadores, tanto para mantener la posición de la embarcación dentro de la esclusa, como en el movimiento de una esclusa a otra. De esta forma se evita usar el sistema mixto actual con preparación y alineamiento para el tránsito con remolcadores y centrado en las cámaras con locomotoras laterales.

La infraestructura finalmente definida por la Autoridad del canal de Panamá (ACP) consiste en dos complejos de esclusas, uno en el Atlántico y otro en el Pacífico, con dos canales de aproximación cada uno. Las esclusas contarán con tres cámaras, de 420 m de longitud, 55 metros de

ancho y 30 metros de altura cada una. Asimismo, cada cámara está cerrada por un set de dos compuertas deslizantes (figuras 6 y 7).

Adjudicación tercer juego de esclusas

Tras un prolongado y minucioso proceso de adjudicación, en agosto de 2009 el consorcio Grupo Unidos por el Canal (GUPC), liderado por Sacyr junto con Impregilo, Jan de Nul y Cusa, obtuvo la mejor puntuación técnica y económica del concurso, por lo que se adjudicó la mayor obra de ingeniería mundial: la construcción del tercer juego de esclusas del canal de Panamá.

El contrato contempla el diseño y construcción de dos complejos de esclusas de tres niveles cada uno, que incluyen:

- Tinas de reutilización de agua.
- Excavación de cauces de acceso a las nuevas esclusas.
- Ensanche de los cauces de navegación existentes.



Fig. 7. Esquema general del proyecto de ampliación del canal de Panamá

- Profundización de los cauces de navegación.
- Elevación del nivel máximo de funcionamiento del lago Gatón.

GUPC realizó un modelo a escala y se definieron los requisitos de funcionamiento, tiempos de llenado y vaciado,

la cantidad de agua que debía ahorrarse en cada esclusaje, la cantidad de agua que podían perder los sellos y la robustez del diseño en su conjunto para que la infraestructura diera servicio el 99,7 % del tiempo, lo que se ha transformado en redundancias de conductos, de elementos mecánicos y de sistemas eléctricos y de control. También se definió el tiempo de vida de la infraestructura



Fig. 8. Modelo a escala realizado en Francia por GUPC

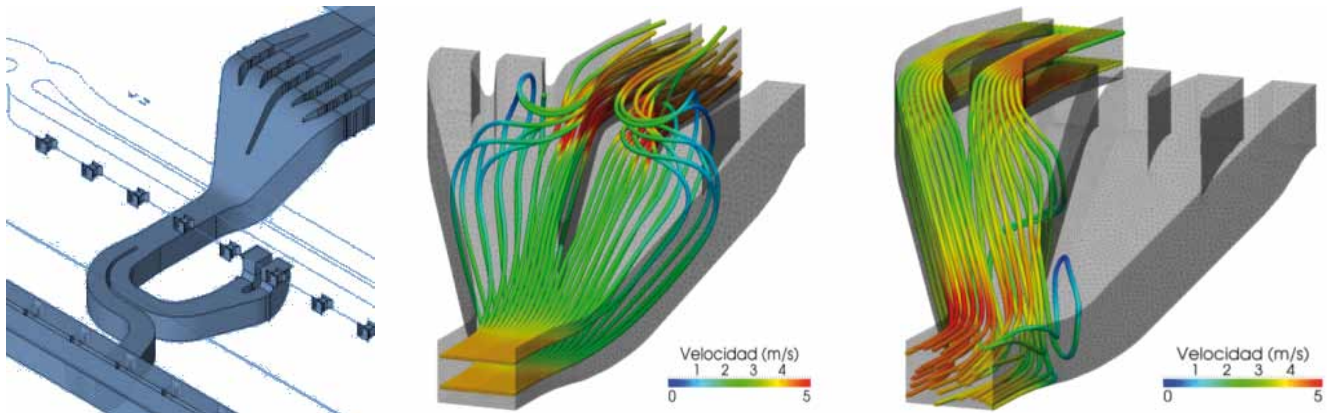


Fig. 9. Elementos del diseño hidráulico

y las aceleraciones sísmicas, así como los requisitos de servicio bajo sismo.

El diseñador seleccionado por GUPC y aprobado por ACP fue un consorcio de ingenierías, CICP, compuesto por MWH (EE. UU), Tetrattech (EE. UU.), Iv Infra Groep (Holanda); para temas concretos también se ha contado con Sener (España), SC Sembenelli (Italia) y Glostten (EE. UU.). Su función principal es desarrollar el diseño de construcción.

Para el total de la coordinación de ingeniería necesaria en la obra, dentro del consorcio GUPC, se ha puesto en marcha

un departamento de servicios técnicos denominado PIO (*Project Integration Office*) que engloba al diseñador principal, las oficinas técnicas de las empresas fabricantes de equipos, los equipos propios de GUPC que han realizado los planos de taller y las oficinas técnicas de obra que interactuaban directamente con los equipos de producción.

Para el diseño, el departamento de integración de proyecto (PIO) y las distintas ingenierías especializadas y oficinas técnicas de fabricantes, han empleado, en el momento de máxima actividad, más de 400 profesionales y han utilizado potentes software de diseño. Entre otros, cabe desta-

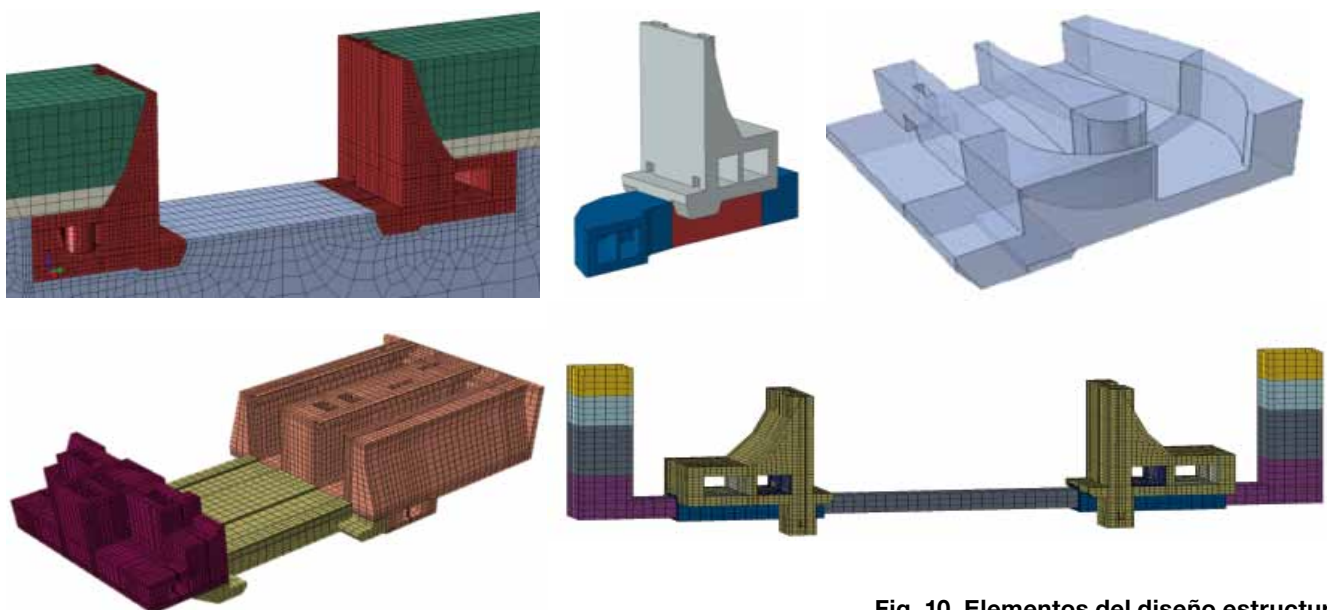


Fig. 10. Elementos del diseño estructural

PARTIDAS MÁS IMPORTANTES (Atlántico y Pacífico)		UD	CANTIDADES
1.-	Dragado	m ³	7.100.000
2.-	Excavaciones en seco	m ³	62.000.000
3.-	Rellenos	m ³	24.000.000
4.-	Materiales filtro	m ³	700.000
5.-	Hormigón estructural	m ³	4.500.000
6.-	Hormigón de nivelación y relleno	m ³	300.000
7.-	Hormigón en bancos de tubos y urbanización	m ³	200.000
8.-	Cemento, puzolana y humo de sílice	t	1.900.000
9.-	Acero para armadura	t	290.000
10.-	Acero en Compuertas y válvulas	t	71.000
11.-	Edificios (48 edificios cada conjunto de esclusas)	m ²	40.000
12.-	Cableado de distintas secciones y tipos	MI	2.100.000

Tabla 1. Cantidades más relevantes del proyecto

car CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para hidráulica (figura 9), FEM (para estructuras de hormigón) (figura 10) y software específicos para equipos mecánicos, además de la construcción de un modelo a escala en Francia (figura 8) que corroboraba los comportamientos hidráulicos predichos por los modelos matemáticos.

Construcción

La construcción se caracteriza por la variedad y complejidad de actividades: movimientos de tierras, estructuras de hormigón, fabricación e instalación de equipos electromecánicos; y por los grandes volúmenes que conlleva el proyecto (tabla 1), todo condicionado por los procesos de investigación para desarrollar algunos de los elementos que no existían en el mercado; los estrictos plazos requeridos, las adversidades climatológicas y el reducido tamaño de la industria auxiliar de la construcción que hay en Panamá para poder apoyarse. En función de todos estos condicionantes, se han establecido secuencias constructivas y recursos necesarios y se han seleccionado fabricantes de elementos mecánicos y de sistemas.

En cuanto a los plazos de construcción, la obra debía construirse en algo más de cinco años, considerando algo más de un año para proyectar y montar las instalaciones auxiliares y siete meses de pruebas y puesta en marcha. Esto deja algo más de tres años para construir los volúmenes señalados en la tabla.

Para los movimientos de tierras (figura 11) se ha utilizado un sistema mixto, con mitad de recursos propios (equipos de movimiento de tierras adquiridos ex profeso) y mitad subcontratado, utilizando equipos de gran tonelaje, como excavadoras de 225 toneladas de carga frontal y dumpers de 100 t. Para la trituración de basalto para los hormigones y filtros, se ha dispuesto de una planta de machaqueo primario y secundario, con capacidad para 2.700 t/hora y de dos plantas de machaqueo terciario y cuaternario para producción, lavado y clasificación de áridos, con capacidad máxima de 1.000 t/hora, una instalada en el Pacífico y otra en el Atlántico (figura 12).

En el momento de máxima producción se ha conseguido mover 100.000 m³ de tierra y se ha triturado 27.000 toneladas de áridos en 24 horas.

La fase de hormigón ha requerido de cuatro plantas de hormigón, dos en el Atlántico y dos en el Pacífico; una pequeña de 100 m³/hora y dos silos para cementicios de 100 t, sin sistema de enfriamiento y una de gran capacidad de 500 m³/hora, dos silos de cemento de 1.500 t, dos silos para puzolana de 1.500 t y un silo para humo de sílice con capacidad para 1.000 t, esta última con instalación de hielo y sistema de enfriamiento de áridos. Para la puesta en obra de hormigón se han utilizado sistemas mixtos de cintas (fijas de 80 m de radio de acción y móviles de hasta 60 m) y bombas de hasta 58 m de alcance con capacidad de bombear árido de 38 mm (figura 13).

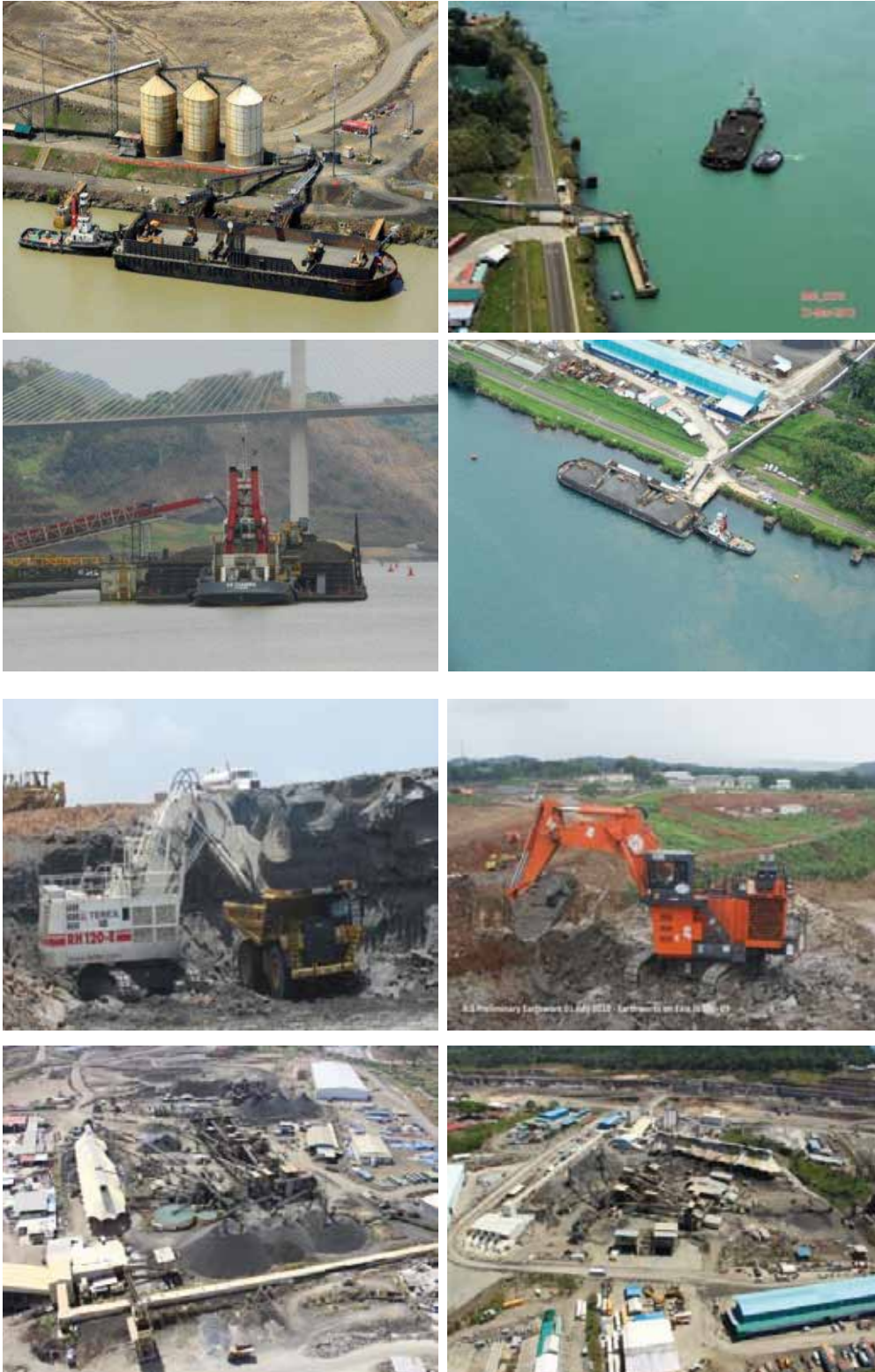


Fig. 11. Instalaciones y equipos para el transporte de piedra del Pacífico al Atlántico mediante barcas de 7.500 ton

Fig. 12. Equipos de movimiento de tierras e instalaciones de machaqueo, Pacífico (izquierda) y Atlántico (derecha)

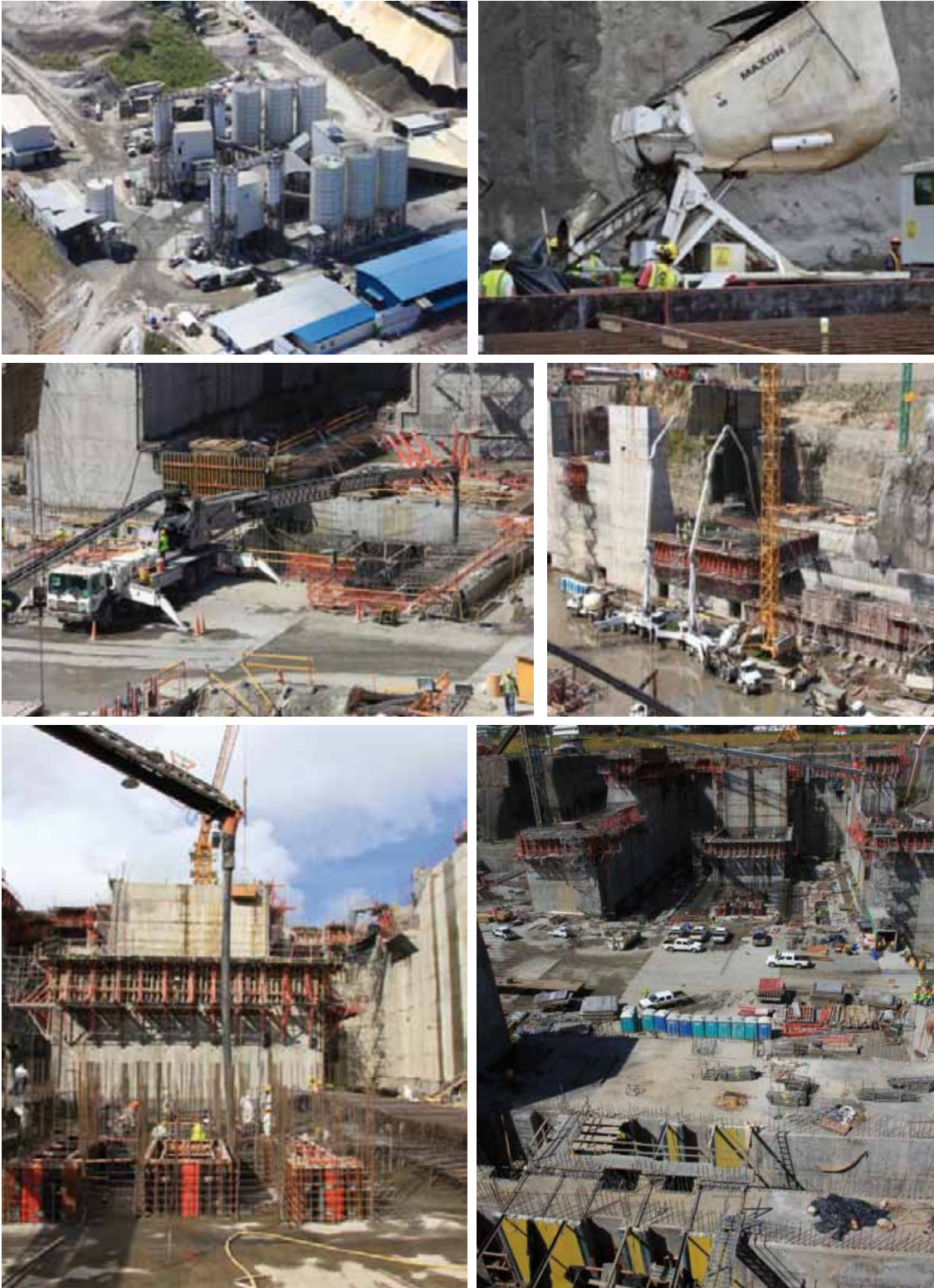


Fig. 13. Planta de hormigón principal, transporte y colocación de hormigón con cinta móvil, bombas y cinta fija sobre grúa torre



Fig. 14. Conjunto de esclusas del lado Atlántico en plena actividad de hormigón en 2012

Para el transporte, se han usado dos tipos de agitadores distintos (bombo giratorio y tolva fija con agitador), ambos montados sobre camión de tres ejes, con capacidad para 8 m³ cada uno.

Los encofrados utilizados han sido los sistemas de trepa de Peri, con paneles a base de viga de madera y forro fenólico, movidos mediante grúa torre. Para el doblado de acero se han dispuesto dos naves de 12.000 m² cada una, con capacidad de hasta 250 t diarias cada una. Para la colocación se ha dispuesto de las grúas de encofrado cuando estaban disponibles y de grúas móviles de entre 30 t y 130 t (figura 14).

En el momento de máxima producción se ha llegado a colocar 10.000 m³ de hormigón y 400 toneladas de acero de refuerzo en 24 horas.

Los grandes elementos mecánicos, han sido fabricados fuera del proyecto y transportados a Panamá para ser instalados (figura 15). Los elementos principales son las compuertas, fabricadas en Italia, las válvulas, fabricadas en Corea, y las estructuras metálicas de los edificios, fabricadas en España. La fabricación de todos estos elementos se realizó desde mediados de 2011 a mediados de 2015 y se instalaron desde mitad de 2013 a mitad de 2015.

Las válvulas, compuertas de mantenimiento de conductos y rejillas, son unas 700 unidades de hasta 30 toneladas de peso, con 44 km de carriles verticales embebidos para que se deslicen en su maniobra de cierre y apertura.

Los elementos de mayor envergadura han sido las compuertas que fueron transportadas de cuatro en cuatro en barco desde Italia a Panamá, descargadas en un puerto que



Fig. 15. Fabricación de elementos mecánicos



Fig. 16. Transporte e instalación de compuertas

construimos en el lado atlántico y trasladadas las ocho del Pacífico una a una sobre una barcaza, para ser descargadas en un muelle en esa vertiente, construido para esta actividad y demolido posteriormente. Desde los barcos hasta su posición final, fueron trasladadas mediante un conjunto de tráileres accionados todos al unísono mediante un *software*, cada compuerta se movía con unas 400 ruedas con capacidad de traslación, freno, giro sobre si misma de 360° y diferencial de elevación de 70 cm. Una vez colocada la compuerta en su posición definitiva se elevó por dos puentes grúa y se dejó sobre los soportes de mantenimiento, lista para ser inundada y poder moverse cuando el agua le diese la flotabilidad necesaria (figura 16).

El proceso de instalación eléctrica y de control se está desarrollando a lo largo de 2015. Cada conjunto de esclusas

precisa 3.000 cuadros o elementos para ser conectados entre sí mediante alimentación eléctrica, cable de control y fibra con transporte de señales. Cada conjunto genera y gestiona 70.000 señales, que alimentan al *software* de control para la gestión del total de la infraestructura.

Innovación

El proyecto del tercer juego de esclusas está marcado por la elevada innovación que conllevan sus componentes, especialmente, las mezclas de hormigón, las compuertas y el *software* de control.

El desarrollo de las mezclas de hormigón que cumplieran con la impermeabilidad ante el ión cloruro ha sido un proceso de investigación preciso y largo, en el que ha intervenido el personal de Sacyr y del Instituto de Ciencias

de la Construcción Eduardo Torroja, concluyendo con mezclas de hormigón que cumplían con los requisitos de impermeabilidad y resistencia, a la vez que tenían la consistencia y trabajabilidad necesarias para ponerlas en obra con medios de producción masivos.

Las compuertas son un prototipo en muchos aspectos, en su sistema de flotabilidad para transmitir cargas al sistema de apoyo y traslación inferiores al 10 % de su peso, así como en el sistema de sello y apoyo de la compuerta en su fase de cierre de la cámara.

El sistema y *software* de control y operación se ha desarrollado totalmente, gestiona 70.000 señales y se caracteriza por su robustez frente a malas maniobras, errores humanos y eventos especiales.

La construcción con la compleja logística de la obra, las plantas industriales y la planificación de detalle ha requerido grandes recursos por parte de GUPC y el desarrollo de nuevos procesos y procedimientos.

Los grandes volúmenes que se han movido en el proyecto han precisado de gran cantidad de maquinaria pesada para ser movidos y colocados, con un calendario muy ajustado y con precipitaciones anuales de hasta 3.600 litros/m² al año. También la previsión de los espacios de acopio y la coordinación con los fabricantes y los transportistas (casi la totalidad de los elementos instalados ha llegado de fuera de Panamá) ha requerido gran atención por parte del equipo técnico encargado de la coordinación de la obra.

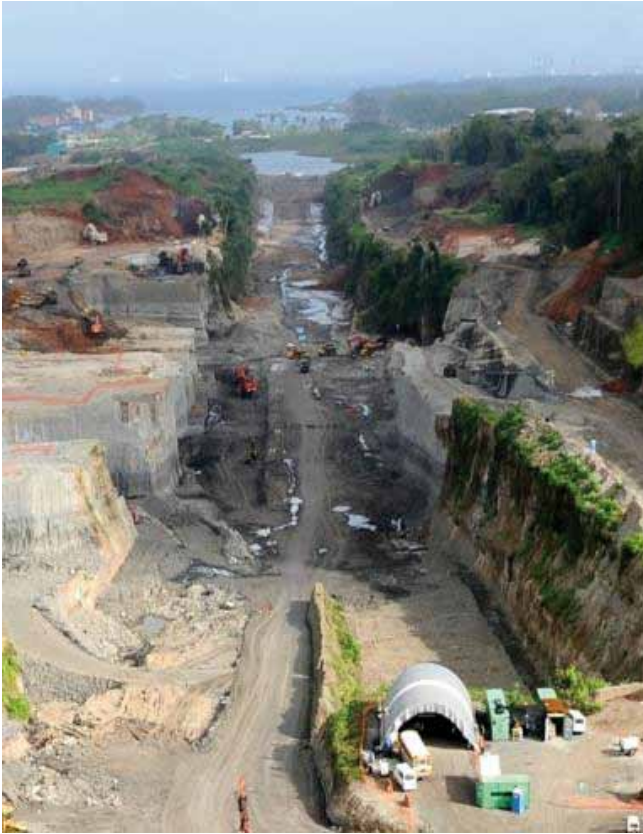
La logística de los recursos humanos ha sido otro capítulo importante en el proyecto, puesto que se han alcanzado las 13.000 personas trabajando en dos turnos. En este sentido, destacan la construcción de un campamento en el lado atlántico para 1.000 personas, así como la puesta en servicio de hasta 160 autobuses con unas 60 rutas externas para transportar a todo el personal desde sus casas hasta la obra. 60 de los autobuses hacían también las rutas internas para distribuir al personal en la obra. Además, se construyeron unos 70.000 m² de aparcamientos para los empleados que venían con vehículo propio. Finalmente, se dividió la obra en áreas de trabajo, atlántico y pacífico, por la distancia entre ellas, y cada lado en cuatro áreas de hormigones, movimiento de tierras, parque industrial, etc. y en cada una de ellas se instalaron contenedores con dos

taquillas por trabajador y comedores para no movilizar a todo el personal en el periodo de comida.

En cada lado de la obra se construyó un parque industrial de unas 100 hectáreas para situar las plantas de machaqueo, las plantas de hormigón, las centrales eléctricas, las estaciones de combustible, las bodegas, los talleres y las naves de corte y doblado de acero.

La planificación de la obra (figura 17) ha necesitado de una gran precisión para coordinar hasta 400 frentes de trabajo abiertos al mismo tiempo que desarrollan distintas actividades, además de los parques industriales; dado que era preciso hacer grandes producciones en espacios muy congestionados de materiales y recursos, se definieron las actividades paso a paso; los recursos necesarios uno a uno y la posición en la obra de los recursos y los materiales, para establecer qué secuencia de construcción y duración exacta de cada actividad. De esta forma era posible, por ejemplo, poner encofrado, acero, elementos embebidos, hormigón, juntas y tratamientos de juntas en áreas de trabajo contiguas. **ROP**





Atlántico - junio 2011



Atlántico - septiembre 2015



Pacífico - julio 2011



Pacífico - septiembre 2015

Fig. 17. Evolución de la obra