

ACUEDUCTOS SUBMARINOS: UN NUEVO CONCEPTO EN EL TRANSPORTE (*)

Dr. ELLIS L. ARMSTRONG
Commissioner, Bureau of Reclamation

Son muchos los campos en los cuales se puede definir el perfil crítico de la época que vivimos; muchos los puntos que demandan un replanteo angustioso de las bases de la existencia, en lo espiritual y en lo material. Probablemente en ninguno se ha alcanzado la conciencia de drama con mayor vigor que en los problemas del agua. La protección del limitado capital hídrico con que la Humanidad dispone y su justa distribución, son temas obsesivos que acucian a la técnica y solicitan soluciones cada día más radicales. El Bureau of Reclamation de los Estados Unidos moviliza su veteranía en el campo hidráulico y se aplica a la investigación sobre la muy nueva ingeniería del trasvase.

La conferencia que publicamos, traducida al castellano por el Dr. Ing. J. A. Herrerías (C.C.P.), testimonia cómo lo que hace poco tiempo era "ciencia-ficción" está ya en los umbrales de la viabilidad práctica. El Dr. Ellis L. Armstrong, cuya autoridad técnica viene endosada por su alto cargo, probablemente el mayor poder hidráulico en el mundo: "Commissioner" del Bureau of Reclamation, vaticina lo inmediato en la extensión de los plexos de transporte de agua dulce a la plataforma continental.

La comunidad recién nacida se estableció sobre una zona de colinas, atendiendo, fundamentalmente, a su defensa, ya que ningún asentamiento estaba inmune, en aquellos días, a la amenaza de un ataque de bandas armadas de bárbaros. La ciudad creció, prosperó y llegó a ser el centro cultural y comercial del mundo conocido, famosa por sus eruditos, soldados, poetas y filósofos. Esta ciudad era, por supuesto, Roma; de ella quedan hoy solamente restos de estructuras espectaculares, carreteras pavimentadas y acueductos.

Los condicionamientos de aquellos acueductos eran los mismos con los que se enfrentan hoy los proyectistas e ingenieros que se ocupan de la captación, conducción y distribución del agua: el aumento creciente de población y dotaciones por una parte y la existencia de zonas naturales deficitarias en agua y zonas con excedentes por otra.

Los historiadores fijan el año 312 a. C. como fecha de terminación del primer acueducto romano, que era un canal de 16 km de longitud, la mayor parte de los cuales sucedían en túnel. Ciento cincuenta años más tarde se construyó el Agua Martia, canal de 90 km de longitud, con tramos de acueductos soportados por arcos. El sistema tuvo tanto éxito, que, en el primer siglo de nuestra era, Roma tenía nueve acueductos, que transportaban diariamente más de 150000 m³ para los residentes en el recinto amurallado, y la mitad de esa cantidad, aproximadamente, a la zona extramuros.

Más de dos mil años más tarde de su introducción el acueducto permanece, un método eficiente para transportar agua. Si bien se han realizado innumerables perfeccionamientos en el proyecto, los materiales y las técnicas de construcción, el principio básico es, prácticamente, el mismo. Por el contrario, durante este tiempo se ha alcanzado un notable desarrollo en la tecnología de recursos hidráulicos. Ade-

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de octubre de 1971.

más del control y almacenamiento del agua en embalses se ha logrado filtrarla y purificarla. La era del reciclaje acaba de empezar, pero se desarrollará rápidamente. Igual ocurre con la desalación del agua de mar y la lluvia artificial, que permitirán utilizar los océanos y aprovechar los ríos del cielo.

Cada vez se emplean mayores cantidades de agua para una mayor variedad de objetivos, con el fin de mejorar la calidad de vida de más gente, localizada en climas y ubicaciones más diferentes. Y, sin embargo, constituye una curiosidad histórica el que el hombre moderno se enfrente todavía con el mismo problema del transporte del agua que inspiró a los ingenieros romanos la concepción, proyecto y construcción de los acueductos. Conducir el agua desde las zonas en donde está disponible hasta los centros de consumo continúa siendo uno de los problemas más incitantes. Problema que requiere un equipo polivalente para resolver los temas de ecología, ingeniería, costes y rendimientos.

El agua es esencial para vivir, y es obvio, desde hace tiempo, para los que se ocupan en la planificación de recursos hidráulicos, que los problemas de abastecimiento se están agravando. Constantemente crecen la población, la densidad y las dotaciones. Ahora, el "Bureau of Reclamation" y demás agencias similares se ven obligados a buscar recursos de agua más remotos para satisfacer una demanda cada vez mayor.

La captación y consiguiente transporte de agua desde fuentes muy distantes no es, ciertamente, un problema específico de la generación actual de ingenieros, pero no es menos cierto que hoy se está aplicando esta solución en mucha mayor escala que nunca: Existen en la actualidad tres proyectos en Estados Unidos que implican el trasvase de las aguas de la cuenca del Pacífico a la vertiente atlántica de la divisoria continental. En Colorado, por ejemplo, el proyecto de trasvase Fryingpan-Arkansas, para abastecimiento y regadíos del valle del río Arkansas, tendrá una longitud de 240 km. El proyecto de Arizona Central solucionará las necesidades de Phoenix y Tucson, proporcionando agua del río Colorado impulsada en un punto situado a más de 300 km de su destino final. El "Bureau of Reclamation" y el Estado de California tienen proyectos conjuntos para transportar agua desde un extremo del Estado al otro, con distancias superiores a los 1600 km. Igualmente, y con la colaboración de otras agencias federales y estatales, se está estudiando el trasvase del río Mississippi a través de Oklahoma a Texas y Nuevo Méjico. Existen varias propuestas, promovidas por intereses no federales, para trasvasar agua desde el lejano Norte a las zonas de climas templados. Estos trasvases se cuentan entre los proyectos de ingeniería más costosos de la historia, y a pesar de los costes crecientes de materiales, construcciones y expropiaciones, parece que no existe ningún impedimento que obstaculice su realización.

El aspecto ecológico, que es obligado considerar en todos estos proyectos, ha alcanzado un punto crítico. Cualquiera que sea el sistema de transporte de agua que se proyecte, producirá efectos, unos beneficiosos y otros perjudiciales, sobre el medio ambiente. Si bien el balance en la zona de consumo es siempre favorable, los canales, tuberías y acueductos necesarios perturban y alteran, en mayor o menor grado, el escenario natural.

Los problemas con que se enfrentan actualmente los especialistas en recursos hidráulicos exigen aplicar —además de conocimientos ecológicos, científicos e inge-

nieriles— la imaginación de planificadores y proyectistas. Un ejemplo que ilustra este principio es el estudio que está realizando el "Bureau of Reclamation" en esta nueva década. Se trata de instalar el bien conocido acueducto en un medio ambiente nuevo: sumergido en el mar, a lo largo de la plataforma continental.

Actualmente, importantes volúmenes de agua se pierden en el mar en determinadas zonas costeras, mientras que, a lo largo de la misma costa, existen regiones urbanas e industriales con necesidades críticas de nuevos abastecimientos. El problema es recoger y transportar ese agua eficiente y económicamente mediante una forma socialmente aceptada hasta el centro de consumo. El acueducto submarino puede ser un procedimiento.

Se necesita un sistema de captación, embalse, regulación y transporte del agua que permita entregarla en la toma del acueducto submarino. La distancia de transporte, las dimensiones del acueducto y la carga requerida determinarán la conveniencia de instalar impulsiones intermedias en puntos estratégicos. Finalmente, serán necesarios dispositivos en la costa para unir el acueducto al sistema de distribución de la zona de consumo.

A lo largo de todas las costas de Estados Unidos existe una plataforma, la plataforma continental, que es accesible y relativamente estable, y sobre la que se podría instalar un acueducto. Es una plataforma llana, arenosa, que se extiende desde 5 a 25 km mar adentro hasta una profundidad de 100 m.

La solución, naturalmente, tiene ciertas dificultades. En primer lugar algunas zonas costeras están cruzadas por fallas conocidas o son sede de movimientos geológicos. Hay también, a lo largo de dicha plataforma, muchos cañones submarinos, y las condiciones del suelo varían desde una disposición generalmente arenosa hasta roca dura por un lado y lodo semilíquido por otro. En la costa oeste, particularmente, se ha comprobado la existencia de terremotos históricos mediante testigos extraídos del fondo de la plataforma. La perspectiva de terremotos es uno de los aspectos que exige una solución ingenieril ya que las corrientes de turbulencia, inducidas por los seísmos, podrían afectar la flotabilidad del acueducto, causar desplazamientos horizontales y producir problemas para la conservación. Se necesitarán profundos estudios sobre las condiciones geológicas y geotécnicas del fondo del océano, ya que el acueducto implica anclajes empotrados y estructuras para el cruce de barrancos de un tipo no experimentado, hasta ahora, bajo el agua. El conocimiento actual de la hidrodinámica del océano, en relación con la mecánica de las mareas, las olas, los diferentes tipos de corriente y la circulación litoral, es insuficiente.

Existen tres métodos diferentes de instalar un acueducto submarino. Enterrar la tubería, o bien colocarla sobre el suelo son las dos formas más convencionales; la tercera posibilidad consiste en utilizar una tubería flotante. La viabilidad del último procedimiento depende de la tubería, probablemente de plástico reforzado; su densidad, combinada con la del agua que transporta, ha de ser menor que la del agua de mar a la profundidad de sumersión. Los investigadores han considerado la posibilidad de un acueducto de 10 m de diámetro, tres veces más grande que la mayor de las tuberías submarinas instaladas. De los varios miles de kilómetros de tubería submarina, instalados para diferentes objetivos, la mayoría tienen diámetros inferiores a un metro.

Uno de los mayores alicientes de la solución en acueducto submarino es el hecho de que eliminaría, virtualmente, el coste de las expropiaciones y, además, algu-

nas de las objeciones formuladas por los ecólogos. Sobre los acueductos convencionales gravita, desde el principio, la pesada carga de las expropiaciones; este factor influye cada vez más a medida que disminuyen las tierras disponibles, aumentando en consecuencia de valor y se incrementan las disposiciones para evitar la alteración del paisaje. Por otra parte, la topografía de la plataforma continental, mucho más llana que las rutas terrestres, la hace más adecuada desde el punto de vista ingenieril. El acueducto submarino introduce, además, otra importante ventaja económica, cual es la eliminación de la necesidad de incorporar energía mecánica o eléctrica, ya que basta construir una presa, cerca de la costa, para crear la energía potencial requerida para transportar el agua a largas distancias.

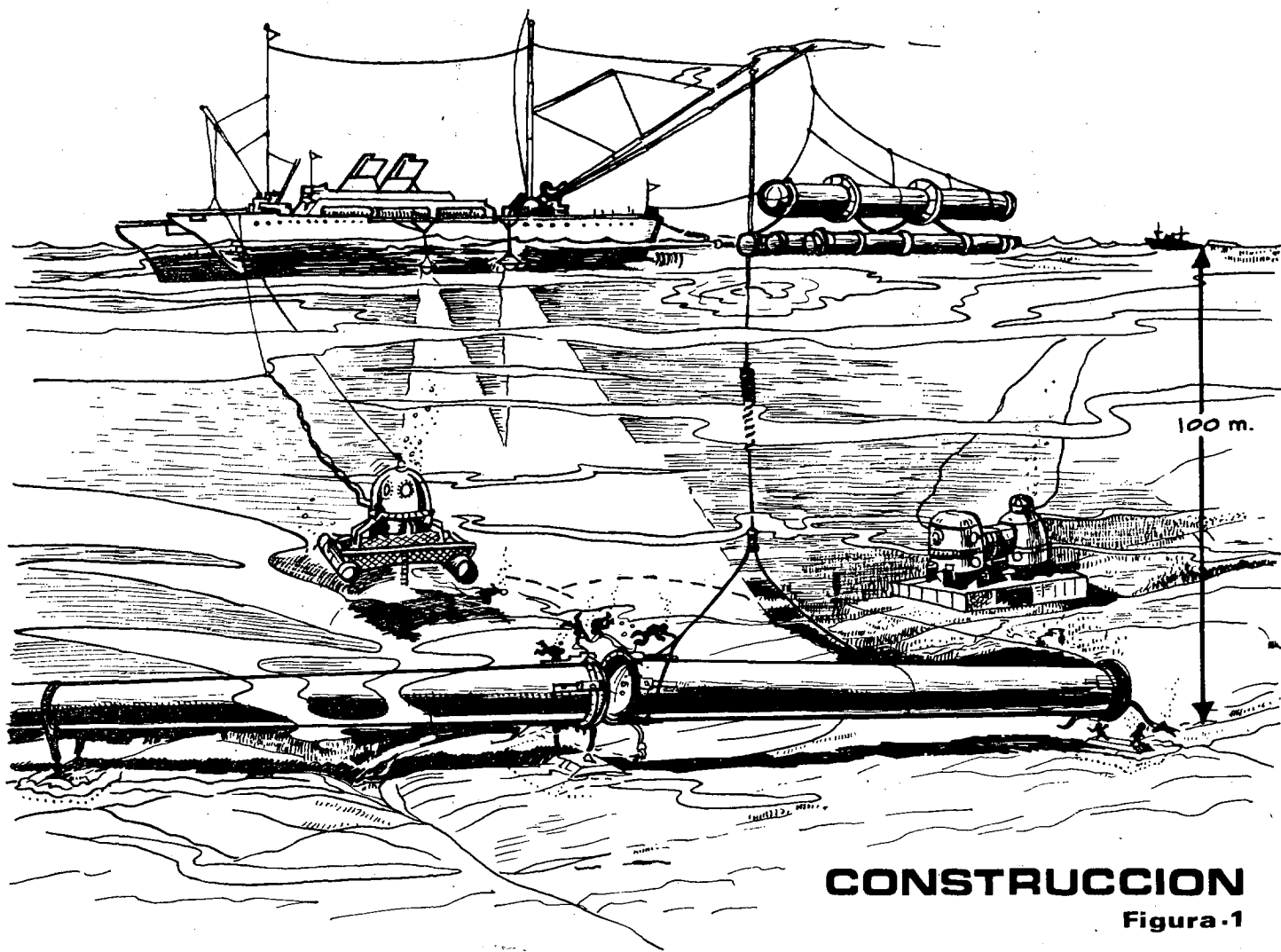
Es de esperar que durante la investigación surjan nuevos materiales y perfeccionamientos de los existentes. Los principales aspectos a considerar son: peso, tensiones admisibles, resistencia a la corrosión. Si bien los plásticos reforzados son una promesa, debe investigarse su comportamiento ante una prolongada exposición al ambiente submarino. Algunos plásticos presentan gran resistencia al ataque biológico, a la polución marina y a la perforación por microorganismos, que son los principales peligros derivados de la exposición en agua de mar. La mayoría de estos materiales tienen un elevado coeficiente resistencia/peso, pero es necesario un extenso programa de ensayos para determinar otras características críticas como son, por ejemplo, la resistencia a tracción y al choque. Deben considerarse las posibilidades de otros materiales, la mayoría de carácter orgánico o no metálico, para los sistemas de anclaje, juntas y elementos accesorios.

Para dar una idea de la dificultad de la investigación basta reseñar el hecho de que existen unas 2000 especies, calificadas como organismos de polución marina, y que algunas son capaces de desarrollarse a razón de 150 Kg/m² cada año. Los principales factores que afectan su desarrollo son: luz, temperatura, localización, profundidad, contenido de oxígeno, corrientes, salinidad y alimentos orgánicos. Algunos de estos organismos son capaces de penetrar, barrenando, en el plástico y en el hormigón, mientras que otros utilizan como alojamiento, y simultáneamente fuente de alimentos, las maderas y materiales constituidos básicamente de celulosa

Se ha investigado ya la resistencia de diferentes materiales frente a la acción del mar, así como los efectos sobre ellos de la acción bactericida y del ataque de los peces. En los últimos años la mayor parte de esa investigación se ha concentrado en las propiedades especiales de los plásticos. Varios de esos materiales no han mostrado ningún deterioro al cabo de seis años de estar sumergidos en el mar, mientras que otros han sufrido solamente daños insignificantes. El tipo y extensión del daño ocurrido está íntimamente ligado con la composición química del plástico empleado. Para completar la exploración y evaluación de los diferentes materiales considerados para este proyecto se ha recomendado iniciar un programa de investigación a largo plazo, de siete a diez años, que incluya ensayos de materiales de amarre y anclaje. La campaña debe incluir boyas de ensayo mediante las cuales muestras representativas de los materiales, amarradas a diferentes profundidades a lo largo de la traza propuesta para el acueducto, sean investigadas.

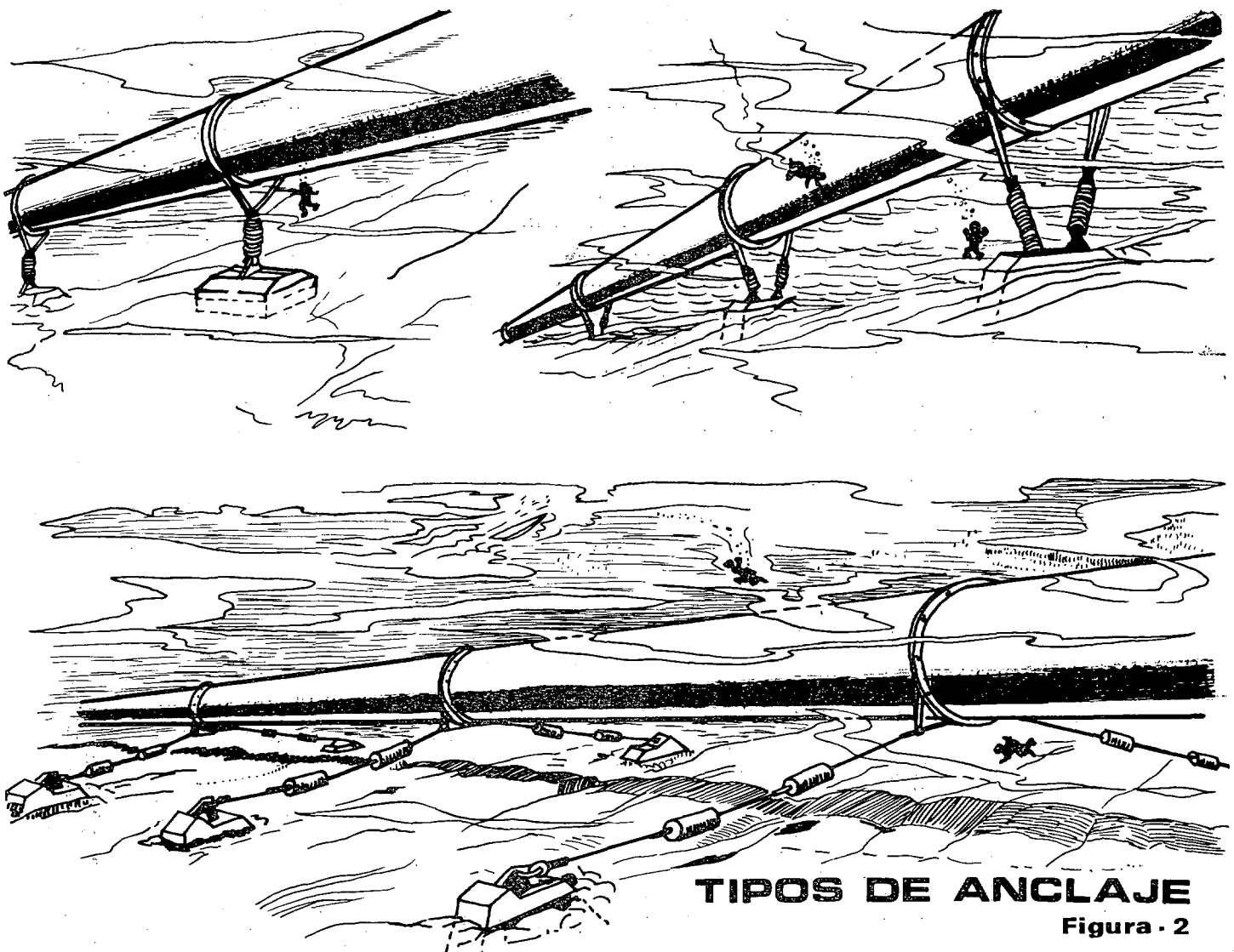
Por cuanto se refiere a la instalación, parece que la tubería de gran diámetro debía ser preparada en la orilla, en una era de montaje, con longitudes convenientes, 130 m aproximadamente. Tal sistema permitiría construir la tubería con un gran

radio, previamente seleccionado, evitando la necesidad de fabricar codos. Esta técnica ofrece las siguientes ventajas: sistematización en su manufactura, facilidad para la conservación y sustitución, notable simplificación en el análisis hidroelástico y pérdidas de carga muy pequeñas. Las secciones de la tubería, en unión de los dispositivos de flotación, podrían ser embarcadas, o remolcadas desde la orilla hasta el lugar designado para ser sumergidas, lo que se conseguiría mediante un sistema de cabrias montadas sobre un barco o barcaza que proporcionaría la plataforma de construcción. La flotabilidad de la tubería instalada podría controlarse constantemente mediante la introducción de agua dulce en la tubería a medida que se ensamblará progresivamente. Será necesario disponer de instrumentos especiales no sólo para la instalación, sino para el mantenimiento del sistema; se prevén equipos con vehículos submarinos y dispositivos de televisión a distancia para poder realizar las inspecciones (fig. 1). Se confía, sin embargo, en que, como sucede normalmente, la mayor parte del equipo estará constituida por adaptaciones del existente sin necesidad de acudir a nuevas investigaciones y proyectos.



CONSTRUCCION

Figura 1



TIPOS DE ANCLAJE

Figura - 2

En una investigación preliminar para el "Bureau of Reclamation", la Compañía "Litton Systems" ha estudiado varios métodos de anclaje de los que algunos se muestran en la figura 2. En uno de ellos la tubería, con límites muy ajustados de tolerancia para la flotabilidad —50 kilogramos por metro, aproximadamente—, se amarra a muelles de tensión y compresión atornillados a pesados anclajes situados en el fondo de la plataforma continental. Tal sistema no es, sin embargo, el más económico y, además, la tolerancia mencionada en unión de las fuerzas de arrastre, relativamente altas, impondrían cargas elevadas sobre los amortiguadores.

Un segundo medio es el de una verdadera tubería flotante (de unos 450 kg/m) sujeta con abrazaderas, en las que la tensión se ejerce tangencialmente, ligadas a pesados anclajes. Con este sistema las fuerzas permanentes de arrastre afectan a la tubería de una forma importante. El movimiento oscilatorio produce desplazamientos horizontales mucho menos importantes que los debidos a las corrientes. En conse-

cuencia, las abrazaderas tangenciales deben ser relativamente largas, con objeto de mantener una proporción aceptable entre la cota del centro de la conducción y su diámetro.

Aunque tenga sus propias desventajas el sistema basado en un solo puntal en tensión es considerado, generalmente, como el más apropiado entre los de retención vertical, para una tubería basada en la flotabilidad. Como en el resto de los sistemas verticales la fuerza de arrastre impone un ángulo inclinado medio constante, que disminuye la oscilación total y permite una reducción parcial en la masa de los anclajes.

Otra posibilidad es la colocación de un amarraje lateral mediante el empleo de pares opuestos de semicatenarias pesadas. Una teoría sostiene que, de esta forma, se amortigua la influencia de las corrientes permanentes y se minimiza el desplazamiento debido a la fuerza de arrastre lateral. Este sistema ha sido utilizado con éxito durante años para sujetar barcos y tanques flotantes sumergidos. Debe ser estudiado en unión del resto de los procedimientos de amarre.

El mantenimiento plantea su propia serie de problemas; la conducción, situada 100 m debajo del agua, será prácticamente inaccesible para procedimientos de conservación convencionales. Realmente su viabilidad depende, en gran parte, de la posibilidad de adaptación de los métodos normales para control y mantenimiento utilizados ya en los acueductos superficiales.

El crecimiento de la fauna, musgo y almejas de agua dulce, por ejemplo, es uno de los problemas importantes de conservación. Existen, sin embargo, varios factores que se oponen al crecimiento en el interior de la tubería. El más importante, probablemente, es la ausencia total de luz, fuente primaria de energía para la transformación de los alimentos. Por otra parte, las bajas temperaturas ambientales, que cabe esperar a esa profundidad, disminuirán el crecimiento de algas. El agua dulce suministrada será normalmente de excelente calidad y, por tanto, bajísima la concentración de sustancias necesarias para sostener tan indeseable vegetación. Una velocidad de 1,5 a 1 m/s sería disuadente muy efectivo de la fauna de agua dulce; sobre todo en superficies lisas, como son las de los materiales plásticos, reforzados con fibra de vidrio, que se están considerando. Existe, además, la posibilidad de tratar el agua previamente para impedir el desarrollo de la mencionada fauna. Aunque dicho tratamiento sería de tipo convencional, supone un coste adicional para las instalaciones costeras y, por tanto, se espera poder evitarle.

Será necesario realizar operaciones rutinarias de conservación y pequeñas reparaciones sin interrumpir el flujo de agua. Para este objetivo, se necesitarán tipos especiales de vehículos submarinos en unión de técnicas y aparatos sofisticados de sumersión. Para evitar la perspectiva de "cortes" prolongados será necesario realizar las reparaciones importantes tan rápida y eficientemente como sea posible. La normalización en las dimensiones de la tubería y en todo el equipo proporcionaría una indudable ayuda en este tema. La instalación de elementos permanentes para la conservación —malecones deslizantes y cabestrantes sumergidos— aportaría otra solución parcial.

El sistema debe ser equipado con mecanismos automáticos de auscultación —transductores, extensómetros, etc.— a intervalos críticos, que indiquen, inme-

diatamente, dónde es necesaria una inspección o reparación. Durante la sustitución de las secciones de la tubería se debe mantener en ésta una velocidad mínima del flujo para impedir la entrada de agua de mar en la tubería abierta. Una alternativa sería la obturación temporal de los extremos abiertos.

El ambiente submarino, al igual que el superficial, posee un sistema ecológico. Desde el principio de la investigación se constató que este sistema ecológico marino es, por lo menos, tan complejo como el superficial, y que, por tanto, debe tenerse gran cuidado y poner atención a las consideraciones ambientales.

A las profundidades consideradas, incluso en las aguas más claras, la luz que penetra desde la superficie es, prácticamente, nula. El desarrollo del fitoplacton se produce a niveles mucho más superficiales, generalmente hasta profundidades máximas de 30 m, de donde se infiere que esta vida marina básica sufrirá poca o ninguna alteración. La ausencia de luz en esas profundidades restringe las variedades de organismos y, particularmente, limita la densidad de las poblaciones de algas.

Las olas, mareas y corrientes oceánicas se perciben levemente a este nivel, pero la agitación producida es suficiente para obtener una mezcla general con su composición química uniforme. Algunos organismos abisales —esto es, los que viven en el fondo o cerca de él, a esta profundidad— pueden ser numerosos y comercialmente valiosos. El acueducto podría constituir un gran beneficio económico y ambiental. Una estructura del tamaño considerado representaría un arrecife artificial, y es un hecho comprobado en biología marina que las obras construidas por el hombre fuera de la orilla ejercen una profunda atracción sobre los peces. Donde se han erigidos tales obras se ha observado que, en un tiempo increíblemente corto, ha aumentado el número y variedad de las especies de peces.

El Departamento de Caza y Pesca de California estudió este fenómeno durante un período de cinco años en siete emplazamientos alejados del litoral, con profundidades comprendidas entre 15 y 30 m. Algunos de los emplazamientos ensayados eran arrecifes artificiales, y otros plataformas, pero en todos los casos la población de peces creció rápidamente durante el primer año, estabilizándose en un nivel más alto; posteriormente se produjeron en el nuevo nivel las fluctuaciones típicas de variaciones termales, estacionales, etc. El fenómeno parece debido a una conducta elemental: refugio y provisión de alimentos que proporcionan los organismos incrustados en la estructura. No es inverosímil que la construcción de un acueducto submarino produjera beneficios inesperados, atrayendo poblaciones de peces, comercialmente explotables, a esta zona de la plataforma continental.

Evidentemente, existe el peligro de dañar el acueducto con los aparejos de pesca; sin embargo, un sistema de boyas de aviso y una red de rampas inclinadas sobre el conducto solucionarían probablemente el problema.

Si bien el proyecto es muy complejo, debe tenerse en cuenta que la ciencia y la tecnología no empiezan actualmente a meditar sobre la explotación del fondo del océano; nos beneficiamos de siglos de experiencia sobre el comportamiento, en ambiente marítimo, de los materiales fabricados y de las obras construidas por el hombre.

El vasto conocimiento acumulado sobre este "nuevo mundo" en las experiencias científicas e ingenieriles realizadas en las últimas décadas es tan significativo

para las generaciones futuras como la aventura espacial. Se ha demostrado ya que el hombre es capaz de vivir y trabajar en el mar, e incluso permanecer durante largos períodos de tiempo en él. Mientras se va agotando rápidamente el espacio superficial aprovechable, la situación se agudiza cada vez más debido al conflicto que supone la densidad de población creciente y la necesidad de espacio, también creciente, para abastecer los servicios básicos exigidos por dicha población. El despertar actual al problema ambiental y la prioridad concedida por la sociedad moderna a su resolución prueban la importancia del conflicto planteado.

Nunca se ha encontrado solución a un problema técnico sin invertir cantidades sustanciales de imaginación y actividad, tanto si el problema es el abastecimiento de agua a la antigua Roma como a la moderna América. Hoy, más que nunca, se necesita imaginación y acción si se quieren lograr soluciones. El plural —soluciones— es, en este caso, premeditado, ya que ningún plan, proyecto o estudio puede ser, por sí solo, la panacea de los problemas de quienes se ocupan del tema, tan trascendental para el bienestar del género humano, de planificar, construir y explotar los sistemas de recursos hidráulicos.

Este es el espíritu con el que el "Bureau of Reclamation" está investigando la viabilidad de un acueducto submarino para el transporte de agua a grandes distancias. No cabe duda de que si es viable constituirá una aportación inédita e interesante al problema del transporte de agua.