

CONSTRUCCIÓN ‘IN-SITU’ DE SIFÓN DE AGUA POTABLE CON FIBRA DE CARBONO MEDIANTE INFUSIÓN Y VACÍO, BAJO LAS VÍAS DEL FERROCARRIL DE MADRID

Debido a la extensión de las grandes ciudades y al complejo entramado de redes de transporte de agua que existe, y que interfiere con otras infraestructuras como autopistas o ferrocarriles, o incluso edificaciones emblemáticas, se producen hoy en día situaciones que imposibilitan el reacondicionamiento de estas conducciones mediante métodos tradicionales. Por esta razón y con la apuesta de una economía circular para conservar y alargar el valor de las redes de distribución de agua, en los últimos años se ha acentuado el uso de las tecnologías sin zanja, las cuales suponen una alternativa segura y eficaz para aquellas conducciones que presentan excesivas complejidades de actuación, como profundas excavaciones, interferencias con instalaciones o servicios cercanos e interrupciones de tráfico y/o suministros.

Dentro de las diferentes soluciones de tecnología sin zanja, destaca por su innovación la fabricación “in-situ” de tuberías mediante fibra de carbono con tecnología de infusión y vacío. Esta tecnología, importada del sector aeronáutico y adaptada al mundo del agua potable, permite restaurar la integridad estructural, proporcionando las propiedades mecánicas requeridas en cualquier punto de la superficie, pudiendo, incluso, soportar caudales y presiones mayores a las originales de diseño sin modificar la instalación.



Figura 1. Diseño de sistema de infusión y vacío en conducción de DN 800 mm
Figure 1. Design of vacuum infusion system in a DN 800 mm siphon

Diseño, fabricación e instalación

Una rehabilitación estructural con fibra de carbono es una alternativa a la rehabilitación tradicional con materiales como el acero y el hormigón, pero con un peso similar al del plástico. Además, es inmune a la corrosión, y tiene dos materiales constituyentes principales:

- El refuerzo o fibra, formado por tejidos con filamentos de carbono, el cual aporta rigidez y resistencia, y soporta los esfuerzos mecánicos.
- Y la matriz o resina polimérica líquida, la cual aporta geometría y cohesión, y transmite los esfuerzos de unas fibras a otras para comportarse como un conjunto.

La rehabilitación de una conducción debe tener en cuenta, entre otras, cuatro cargas principales: tensión / tracción, compresión,

ONSITE CONSTRUCTION OF A CARBON FIBRE SIPHON BENEATH RAILWAY TRACKS IN MADRID USING VACUUM INFUSION TECHNOLOGY

The size of large cities and the complexity of water conveyance networks, which interfere with other infrastructures such as motorways, railways and even emblematic buildings, sometimes make it impossible to recondition pipelines using traditional methods. For this reason, along with a commitment to a circular economy aimed at conserving and extending the value of water supply networks, trenchless technologies have been increasingly implemented in recent years. These technologies offer a safe and effective alternative for pipelines where the execution of actions is extremely complex and involves deep excavations, interference with nearby facilities or services, and interruptions to traffic and/or the supply of goods.

Due to its innovative nature, onsite manufacture of pipes using carbon fibre with vacuum infusion technology stands out amongst the different trenchless technology solutions available. Vacuum infusion technology, imported from the aeronautical sector and adapted to the world of drinking water, makes it possible to restore structural integrity, provide the required mechanical properties at any point on the surface, and enable the withstanding of flow rates and pressures greater than the original design pressures without modifying the installation.

Design, manufacture and installation

Structural rehabilitation with carbon fibre is an alternative to traditional rehabilitation with materials such as steel and concrete, but with a weight similar to that of plastic. Carbon fibre is also immune to corrosion and has two main constituent materials:

- The reinforcement or fibre, made up of woven carbon filaments, which provides rigidity and strength, and withstands mechanical stresses.
- The matrix or liquid polymer resin, which provides geometry and cohesion, and transmits the stresses from one fibre to another to enable the material to behave as a whole.

Amongst other factors, four main loads must be taken into account in pipeline rehabilitation: tensile/traction loads, compression, shear and bending. In order to meet load demands, three key parameters associated with carbon fibre come into play:

- Definition of the material type
- Configuration or architecture of the structure
- The implementation process

Both the type of material and the configuration of the structure are key factors, but the implementation process is decisive. There are three recognised implementation processes:

- Hand lay-up
- Hand lay-up with vacuum bagging
- Automated vacuum infusion process (subject of this article)

Hand lay-up processes have issues associated with worker fatigue, worker skills, gravity and, consequently, with the irregularity of the final result and human error. Throughout



Figura 2. Proceso de colocación del sistema automatizado en tubería de agua potable | Figure 2. Installation of automated system in a drinking water pipe

history, these issues have led to significant doubts within society about the safety and reliability of these interventions, which, in turn has resulted in their use being limited to specific faults or low-risk situations.

The solution to these uncertainties lies in the automation of the process through the implementation of vacuum infusion. This technology, which comes from the aeronautical sector and is perfectly adapted to the world of drinking water, eliminates the human factor and adverse conditions from the equation. It ensures homogeneity of mechanical properties and

cizallamiento y flexión. Para cumplir con el escenario de cargas, el diseño de la fibra de carbono tiene 3 parámetros clave:

- La definición del tipo de material
- La configuración o arquitectura del tejido
- El proceso de implantación

Tanto el tipo de material como la configuración del tejido son factores clave, sin embargo, el proceso de implantación es determinante. Existen tres procesos de implantación reconocidos:

- Manual por contacto
- Manual con presión de vacío
- Automatizado con infusión y vacío (objeto del presente artículo)

Los procesos manuales deben lidiar con el cansancio de los trabajadores, la maestría, la gravedad y, en consecuencia, con la irregularidad del resultado final y el error humano. Esta situación, a lo largo de la historia, ha generado en la sociedad importantes dudas acerca de la seguridad y fiabilidad de estas intervenciones, limitándose a ser utilizadas en fallas puntuales o en situaciones de bajo riesgo.

La solución a estas inseguridades se encuentra en la automatización del proceso mediante infusión y vacío. Esta tecnología, proveniente del sector aeronáutico y perfectamente adaptada al mundo del agua potable, elimina de la ecuación el factor humano, las condiciones adversas, y garantiza una homogeneidad de propiedades mecánicas, así como la regularidad de los resultados, llevando a la práctica de forma precisa las hipótesis de cálculo teóricas.

consistent results by putting the theoretical calculation hypotheses into practice in a precise manner.

The advantages of an automated process over manual applications are described below:

- Better mechanical performance in in-situ processing. Up to 10 times more strength than the same application by hand.
- Large thicknesses can be produced homogeneously, obtaining the highest possible fibre volume fractions and the same weight.
- Low resin content and high reduction of air voids. The percentages by weight are around 60% fibre and 40% resin.
- No dependence on worker skills, eliminating the human factor of fatigue, speed, lack or excess of impregnation, lack of compaction between layers, insufficient bonding to the substrate or poor adaptation to the existing geometry.
- Homogeneity of mechanical properties throughout the entire system, structure or piece. Ideal for complex geometries, vertical or inclined sections, upper zones, long sections and the upper generatrix of any piping or pressurised equipment.
- Absence of VOCs in the atmosphere. Eco-friendly and worker-friendly system, eliminating direct contact with wet fibre and resin, as well as the inhalation of vapours from the resin.
- Offers option of customised work, metre by metre, depending on the needs of each section.

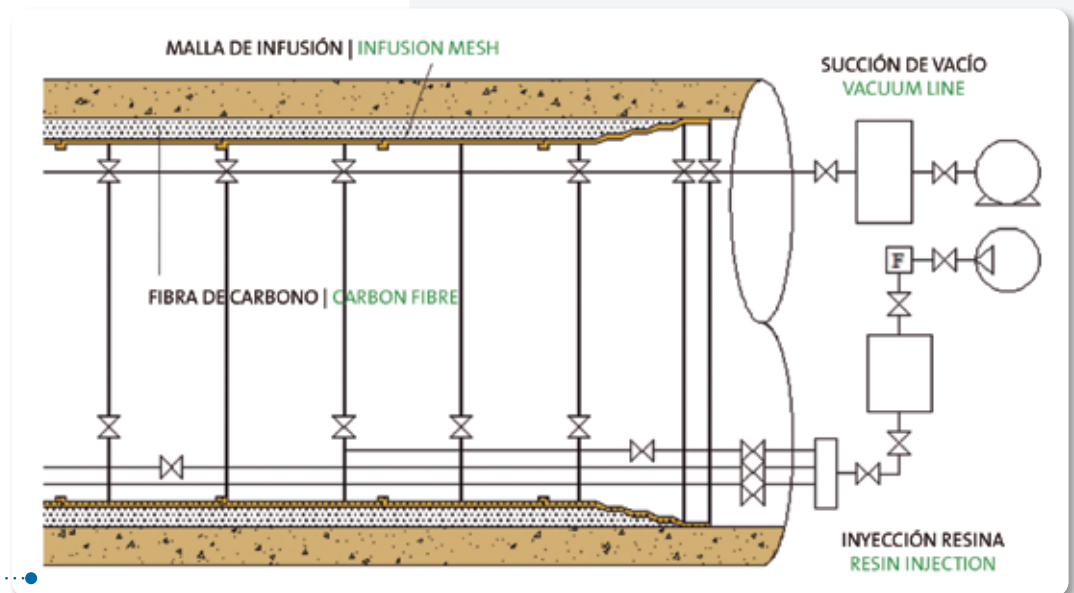


Figura 3. Diseño de regulación y control de infusión y vacío | Figure 3. Design of regulation and control of vacuum infusion

Las ventajas de un proceso automatizado con respecto a las aplicaciones manuales se resumen a continuación:

- Mejores prestaciones mecánicas en un procesado in-situ. Hasta 10 veces más resistencia que la misma aplicación realizada a mano.
- Pueden realizarse espesores de grandes dimensiones de forma homogénea, obteniendo las mayores fracciones de volumen de fibra posibles y el mismo peso.
- Bajo contenido de resina y alta reducción de huecos de aire. Los porcentajes en peso están en torno a 60% fibra y 40% resina.
- No depende de las habilidades de los trabajadores, eliminando el factor humano de cansancio, rapidez, falta o exceso de impregnación, falta de compactación entre capas, insuficiente adherencia sobre el sustrato o mala adaptación a la geometría existente.
- Homogeneidad de propiedades mecánicas a lo largo de todo el sistema, estructura o pieza. Ideal para geometrías complejas, tramos verticales o inclinados, zonas superiores, grandes alcances y generatriz superior de cualquier tubería o equipo a presión.
- Ausencia de volátiles en la atmósfera. Sistema respetuoso con el medio ambiente y con los trabajadores, eliminando el contacto directo con fibra húmeda y resina, así como la inhalación de vapores procedentes de la resina.
- Posibilidad de realización de trabajo a medida, metro a metro, en función de necesidad en cada tramo.
- Garantía del contacto con agua potable al no haber migración de estirenos y cumplir con el reglamento RD 140/2003.

Caso de éxito: sifón de DN 1600 mm bajo ferrocarril, Madrid

Tal y como se menciona en la introducción, se ha detectado la necesidad de reforzar un sifón de hormigón pretensado con camisa de chapa de 1.600 mm de diámetro y presión de 7 bar, que discurre bajo las líneas de ferrocarril que dan acceso a la estación de Chamartín, por donde circulan más de 900 trenes al día.

El tramo de tubería a reforzar tiene una longitud de ± 190 m y unas inclinaciones máximas de 60° , que requieren de la necesidad de afrontar la obra con especialistas en trabajos verticales.

Para el diseño de la nueva conducción se considera un espesor de refuerzo con fibra de carbono de ± 8 mm, trabajando simultáneamente con 4 equipos distintos, que acceden a través de dos ventosas en los puntos altos del sifón y desde una boca de hombre en la mitad del tramo horizontal, todas de 600 mm de diámetro.

La intervención ha consistido en:

- Limpieza, eliminación de contaminantes visibles, lodos y hormigón no adherido firmemente mediante agua a presión.
- Instalación de sistema de ventilación para garantizar oxígeno (tiro natural/forzado) en el interior de la tubería durante los trabajos, así como vigilancia en los puntos de acceso.
- Deshumidificación y atemperado con calentadores de aire forzado y ventiladores.



Figura 4. Sistema de infusión y vacío en tramo inclinado de sifón DN 1600 mm
Figure 4. Vacuum infusion system in inclined section of siphon with diameter of DN 1600 mm

- Guaranteed for contact with drinking water as there is no styrene migration. Compliant with Royal Decree 140/2003 regulations.

Case study: DN 1600 mm siphon under railway line, Madrid

As mentioned in the introduction, a need was identified to reinforce a prestressed concrete siphon with a 1600 mm diameter, sheet metal jacket and a pressure of 7 bar. The siphon runs under the railway lines entering Chamartín station, which carry over 900 trains per day.

The section of pipe to be reinforced had a length of ± 190 m and maximum inclinations of 60° , meaning that the work had to be carried out by specialists in working at heights.

In the design of the new pipeline, a carbon fibre reinforcement thickness of ± 8 mm was selected. Work was carried out simultaneously with 4 different teams, who accessed the worksite through two air valves at the top of the siphon and from a manhole in the middle of the horizontal section, all with diameters of 600 mm.

The work carried out consisted of:

- Cleaning, removal of visible contaminants, sludge and unbonded concrete by means of pressurised water.
- Installation of ventilation system to ensure oxygen (natural/forced draft) inside the pipeline during the works, as well as monitoring at access points.
- Dehumidification and tempering with forced air heaters and fans.
- Surface preparation using hand tools, wire brushes and abrasive sandpaper. Vacuuming of dust, loose particles and waste generated.
- Inspection of quality of the surface preparation in accordance with ICRI Guideline 310.2R.
- Checking of surface moisture with pinless moisture meter.
- Continuous inspection of ambient conditions throughout the process with electronic hygrometers.



Figura 5. Sistema de infusión y vacío en tramo vertical de sifón DN 1600 mm
Figure 5. Vacuum infusion system in vertical section of siphon with diameter of DN 1600 mm

- Priming of the treated substrate with epoxy resin and temporary protective fabric.
- In-situ execution of monolithic structural reinforcement using vacuum infusion technology with carbon fibre and an epoxy resin matrix, maintaining homogeneous and constant vacuum pressure until the end of the curing cycle.
- Application of finish coating for potable water.

- Preparación de la superficie mediante herramientas manuales, cepillos de alambres y lijas abrasivas. Aspiración de polvo, partículas sueltas y residuo generado.
- Inspección de calidad de la preparación superficial según ICRI Guideline 310.2R.
- Comprobación de humedad superficial con medidor en contacto sin agujas.
- Inspección de condiciones ambientales de forma continuada durante todo el proceso con higrómetros electrónicos.
- Imprimación del sustrato tratado mediante resina epoxi y tejido de protección temporal.
- Realización in-situ de refuerzo estructural monolítico mediante fibra de carbono y matriz epoxídica empleando tecnología de infusión y vacío, manteniendo una presión de vacío homogénea y constante hasta la finalización del ciclo de curado.
- Aplicación de recubrimiento de acabado para agua potable.

Conclusiones

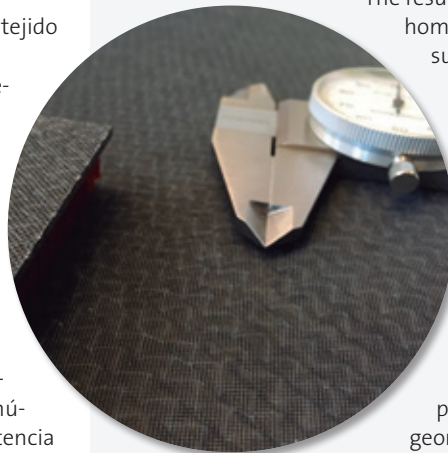
En definitiva, en este artículo se explica el sistema consistente en fabricar una tubería con fibra de carbono in situ por vía húmeda mediante la infusión de una resina epoxi de alta resistencia y su posterior consolidación a presión de vacío mantenida hasta la finalización del ciclo de polimerización.

El conjunto resultante, homogéneo en toda la superficie, resuelve las carencias e incertidumbres generadas por las aplicaciones manuales derivadas del factor humano, como son la falta de impregnación o exceso de resina, oclusiones de aire, sensibilidad a la delaminación, falta de compactación entre capas de fibra, insuficiente adherencia sobre el sustrato o mala adaptación a la geometría existente. Se absorbe únicamente la cantidad de resina necesaria en función del gramaje utilizado en la fibra de carbono, obteniendo las propiedades mecánicas óptimas extraídas en las hipótesis de cálculo.

Esta metodología supone una alternativa segura, fiable y eficaz para todas aquellas conducciones cuya reparación supone un importante desafío debido a la complejidad de actuación por medios tradicionales. ■

Conclusions

This article describes a system encompassing the in-situ production of a carbon fibre pipe, using a wet lay-up process with the infusion of a high-strength epoxy resin and the subsequent consolidation of this resin under vacuum pressure until completion of the polymerisation cycle.



The resulting assembly is homogeneous over the entire surface and overcomes the shortcomings and uncertainties associated with hand lay-up processes, such as lack of impregnation or excess resin, air occlusions, sensitivity to delamination, lack of compaction between layers of fibre, insufficient bonding with the substrate or poor adaptation to the existing geometry. Only the required quantity of resin is absorbed, in accordance with the grammage used in the carbon fibre, and optimal mechanical properties are achieved, in line with the theoretical calculation hypotheses.

This methodology is a safe, reliable and effective alternative for all pipelines where repair is a major challenge due to the difficulties associated with the implementation of traditional methods. ■



Francesc Robles
Grupo Navec



Mario Losañez
Grupo Navec