

Técnica novedosa en construcción de elementos de cimentación profunda, reducción de la huella de carbono: pilas de cimentación con costilla perimetral

New technique in the construction of deep foundation elements, reduction of the impact on carbon footprint: foundation piles with perimeter rib

Juan Paulín Aguirre

Dirección de Ingeniería, Soletanche Bachy Iberoamérica, México, paulin.juan@solexpert.com

José Guillermo Clavellina Miller

Dirección de Ingeniería, Cimentaciones Mexicanas, México, clavellina.guillermo@cimesa.net

Élise Goetz

Gerencia de Medio Ambiente, Cimentaciones Mexicanas, México, goetz.elise@cimesa.net

RESUMEN: La industria de la construcción ha asumido el compromiso de reducir el impacto al medio ambiente, a través de la reducción de la huella de carbono reduciendo el consumo de combustibles fósiles, optimizando el uso de la electricidad y de los materiales de construcción. Para esto, el Grupo Soletanche Bachy desarrolló una técnica constructiva para pilas de cimentación que reduce de forma importante los volúmenes de concreto para la misma capacidad geotécnica de procesos constructivos convencionales. El proceso constructivo se llama T-PILE®, el cual es una modificación de la herramienta STARSOL® para formar una costilla perimetral en toda la altura del elemento. Una variante del procedimiento desplaza lateralmente el suelo durante el descenso de la herramienta eliminando el producto de excavación. La técnica T-PILE® está certificada internacionalmente como proceso constructivo y su dependiente método de cálculo de capacidades de carga geotécnica y estructural. Los diámetros van de 420/620 a 1520/1720mm y profundidades hasta los 50m. En este trabajo se describe el proceso constructivo T-PILE®, se dan las referencias de su certificación, se presentan algunos proyectos internacionales en los cuales se ha aplicado y se hace una estimación de la reducción del impacto en huella de carbono.

ABSTRACT: The construction industry is committed to reducing its impact on the environment by reducing its carbon footprint by reducing the consumption of fossil fuels and optimizing the use of electricity and construction materials. For this, the Soletanche Bachy Group developed a construction technique for foundation piles that significantly reduces concrete volumes for the same geotechnical capacity of conventional construction processes. The construction process is called T-PILE® which is a modification of the STARSOL® tool to form a perimeter rib over the entire height of the element. A variant of the process moves the ground laterally during the lowering of the tool, reducing the excavation product. The T-PILE® technique is internationally certified as a construction process and its dependent method of calculating geotechnical and structural load capacities. The diameters range from 420/620 to 1520/1720mm and depths up to 50m. This paper describes the T-PILE® construction process, gives the references of its certification, presents some international projects in which it has been applied and makes an estimate of the reduction of the impact on carbon footprint.

KEYWORDS: cimentación profunda, T-PILE, huella carbono, capacidad geotécnica, diseño optimizado.

1 ANTECEDENTE AL T-PILE®

1.1 Pilas STARSOL®

El sistema STARSOL® ha sido desarrollado por el Grupo Soletanche Bachy desde 1982. Las pilas de cimentación STARSOL® son elementos perforados con equipos de barrena continua (CFA, *Continuous Flight Auger*), con la característica distintiva de realizar el vaciado de concreto mediante un tubo de inmersión telescópico de 1.5m de longitud -ver Figura 1-, que se desliza desde el interior de la barrena y cuya base permanece sumergida constantemente en el concreto que se coloca, evitando el “corte” indeseable de la pila, riesgo latente en equipos CFA convencionales. Con el tubo interior sumergido, la colocación del concreto es simultánea al retiro de la herramienta de perforación.

El equipo incluye el registro continuo de parámetros de perforación y de vaciado de concreto en tiempo real mediante el

sistema ENBESOL® -ver Figura 2-. La jaula de acero de refuerzo se coloca por gravedad y trepidación con ayuda de un vibrohincador.

En Europa existe la certificación de procesos constructivos que caen fuera de las especificaciones de los reglamentos. El CEREMA (*Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement*) y la *Université Gustave Eiffel* han certificado la técnica STARSOL® como proceso constructivo y como el dependiente método de cálculo de capacidades de carga geotécnica-estructural. Los diámetros logrados van de 420 a 1520mm y profundidades hasta 50m, ejemplo: pilas STARSOL® de 50m y 1.02m de diámetro para el proyecto biofarmacéutica alemana Sartorius, situado en *Aubagne* (sur de Francia).



Figura 1. Tubo de inmersión telescópico en STARSOL®.



Figura 3. Tubo de inmersión telescópico y "diente" en T-PILE®.



Figura 2. Sistema de registro de parámetros ENBESOL®.

2 T-PILE®

2.1 Particularidades

El proceso T-PILE® modifica las características de las pilas STARSOL® mediante la creación de una nervadura helicoidal de concreto con un paso regular a todo lo largo del fuste de la pila. La salida del "diente" que crea la nervadura helicoidal se realiza mecánicamente por la acción de los gatos hidráulicos que accionan el tubo telescópico de inmersión, por lo que la aparición del "diente" y el inicio del vaciado de concreto son simultáneos -ver Figura 3-.

2.2 Fases de ejecución

De forma general, las fases de ejecución del proceso T-PILE® son:

1) Perforación en rotación. La barrena, con el tubo de inmersión retraído, perfora hasta alcanzar la profundidad de proyecto.

2) Inicio del colado. La barrena sube mientras el tubo de inmersión permanece fijo en la base de la perforación (hasta que alcanza una altura de 1.5m), gracias a los gatos hidráulicos ubicados en el cabezal giratorio del equipo. El concreto llega a presión a la base de la perforación.

3) Vaciado general de concreto. La barrena y el tubo de inmersión suben juntos a medida que se realiza el vaciado de concreto. El concreto sale a través de los orificios del tubo de inmersión -ver Figura 3-, sin riesgo de contaminación o cortes en el concreto. El "diente" sale de la barrena formando, durante el ascenso de la barrena, la costilla helicoidal. Las velocidades de rotación y de ascenso de la barrena se controlan para lograr un paso constante de la costilla. Durante todo el proceso de vaciado de concreto el sistema de adquisición de datos ENBESOL® registra

los valores de presión de concreto y volumen colocado, relacionados con la profundidad de la pila. El paso de la costilla helicoidal se monitorea continuamente durante todo el proceso.

4) El suelo empujado por las hélices de la barrena sale a la superficie, a nivel de la plataforma de trabajo, donde se limpia. Así hasta finalizar el colado.

5) Se coloca la jaula de refuerzo por gravedad, o de ser necesario, con ayuda de un vibro-hincador.

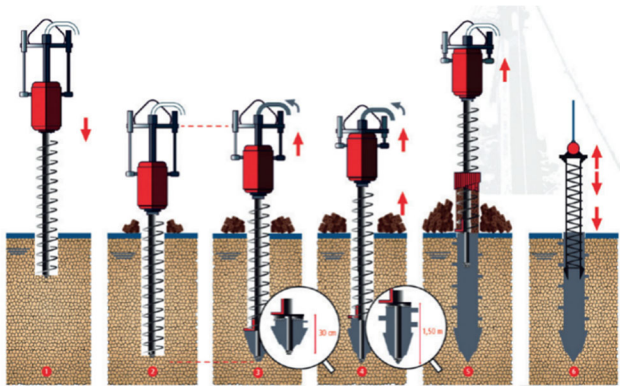


Figura 4. Fases de ejecución de pilas de cimentación T-PILE®.

2.3 Aplicabilidad

El campo de aplicación del T-PILE® se limita a los suelos en los que el “diente” puede generarse -ver Figura 5-. Con base en la experiencia del Grupo Soletanche Bachy aplica a aquellos suelos con presión límite, p_l , en prueba presiométrica PMT no mayor a 5MPa. Para valores de p_l mayores se deben realizar pruebas de viabilidad del procedimiento.

2.4 Características geométricas

Las dimensiones comunes de las pilas T-PILE® se presentan en la Tabla 1. D1 es el diámetro nominal de la barrena y D2 es el diámetro total de la herramienta incluyendo la costilla helicoidal generada alrededor de la barrena de diámetro nominal D1.



Figura 5. T-PILE®.

2.5 Control de la formación de la costilla

La formación de la costilla helicoidal se controla durante la ejecución, en tiempo real, mediante el sistema ENBESOL®. Se registran la profundidad de salida del “diente”, el paso de la costilla, la presión y el volumen del concreto. La gráfica obtenida al final de la construcción de cada pila de cimentación deja registro de estos parámetros.

De manera física se puede verificar la existencia de la costilla excavando y descubriendo la parte superior de la pila. Se recomienda la excavación de la cabeza de 1 pila por cada 100 pilas construidas, con un mínimo de 2 verificaciones por sitio.

Tabla 1. Dimensiones para pilas T-PILE®.

D1 (cm)	D2 (cm)
27	47
32	52
42	62
52	72
62	82
72	92
82	102
92	112
102	122
112	132
122	142
132	152
142	162
152	172

2.6 Capacidad de carga

De acuerdo con la metodología de cálculo certificada internacionalmente los cálculos de capacidad de carga, tanto por fricción como por punta, se realizan en función de un diámetro $D_3 = D_2 - 4\text{cm}$.

La metodología de cálculo para pilas STARSOL® es aplicable para pilas tipo T-PILE® basada en la definición de coeficientes de punta y fricción, a partir de valores de presión límite (p_l) o resistencia de cono (q_c) para diferentes tipos de suelo, referencia Soletanche Bachy Fondations Speciales. 2021.

2.7 Certificación de procedimiento

En Europa existe la certificación de procesos constructivos que caen fuera de las especificaciones de los reglamentos. El CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) y la Université Gustave Eiffel han certificado las técnicas STARSOL® y la T-PILE® como procesos constructivos y como el dependiente método de cálculo de capacidades de carga geotécnica-estructural. Esta posibilidad está reconocida en el Eurocódigo 7 (NF P94-262).

2.8 T-PILE® de desplazamiento

Una variante del procedimiento T-PILE® permite eliminar el producto de la excavación mediante el uso de una barrena que desplaza el suelo lateralmente durante su descenso. Las ventajas del tubo telescópico de inmersión y la costilla helicoidal se mantienen en esta variante, ver Figura 6.

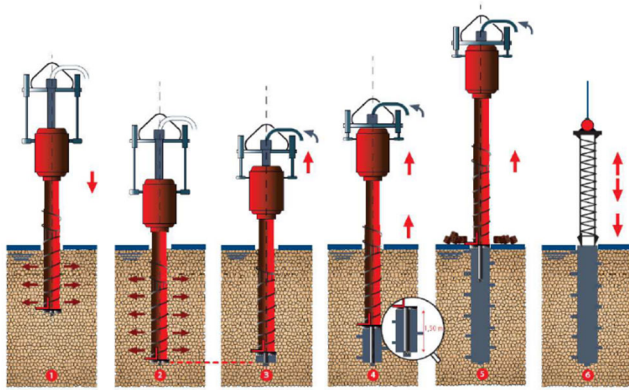


Figura 6. Fases de ejecución de pilas T-PILE® de desplazamiento.

El desplazamiento lateral del suelo sin extracción de material, la colocación del concreto a presión, usualmente generan un incremento de capacidad de carga geotécnica en comparación con los métodos tradicionales de perforación bajo lodo.

En la Figura 7 se ven tramos de una pila T-PILE® de desplazamiento recuperados con una excavación.



Figura 7. Tramos exhumados de una T-PILE® de desplazamiento.

3 BENEFICIO MEDIO AMBIENTAL

3.1 Reducción del consumo de concreto

Es bien sabido que la huella de carbono que genera la industria de la construcción tiene dos orígenes principales: la producción de acero y la producción de cemento. Por tanto, hoy en día es prioritario desarrollar técnicas o metodologías de diseño y constructivas que permitan reducir el consumo de dichos materiales.

Las Pilas T-PILE® permiten obtener la misma capacidad de carga geotécnica de una pila con fuste recto, pero mediante el consumo de un menor volumen de concreto.

Para diámetros exteriores, D2, de hasta 82cm, se estiman reducciones en el consumo de concreto de 55% en promedio, mientras que para diámetros mayores el promedio es de 29%.

La huella de carbono es el parámetro utilizado actualmente para cuantificar el impacto que tiene nuestra actividad en el medio ambiente. Existen calculadoras para obtener el equivalente en huella de carbono del consumo de cemento, agregados, agua, aditivos, adiciones y transporte para un concreto.

Utilizando una calculadora interna, la cual se basa en la desarrollada por la *European Federation of Foundation Contractors* (EFFC) y el *Deep Foundations Institute* (DFI) se presenta en la Tabla 2 una comparación en toneladas de carbón equivalente -huella de carbono-, para distintos diámetros de pilas

asumiendo una profundidad de 25m. W_{conv} es para pilas de fuste recto, sin costilla perimetral, W_{T-Pile} es para pilas T-Pile para el diámetro que corresponde a la pila de fuste recto sin costilla. Los diámetros estudiados van de 52 a 142cm, la reducción en huella de carbono varía del 61 al 25% (cuando el diámetro aumenta la reducción disminuye).

Tabla 2. Ejemplo en huella de carbono (t) por la aportación del concreto para pilas 25m de profundidad.

D1 (cm)	D2 (cm)	W_{conv} (t)	W_{T-Pile} (t)	Reducción (%)
32	52	1.52	0.6	61
62	82	3.77	2.21	41
92	112	7.03	4.85	31
122	142	11.30	8.51	25

El cálculo anterior es considerado un concreto con cemento convencional y un diseño de mezcla adecuado al proceso constructivo.

Actualmente hay distintos ejes de trabajo para reducir nuestras emisiones de gases de efecto invernadero, Goetz É. 2023. Dado que las obras de cimentación constituyen las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero del sector, los actores de este campo están trabajando hoy en día en el diseño de concretos bajos en carbono y aceros con alto grado de acero reciclado. En ambos casos, la optimización del diseño es clave para la reducción de emisiones. En lo que respecta al concreto, los ejes de trabajo incluyen la sustitución del *Clinker* en el cemento por adiciones provenientes de residuos de otros procesos, como la ceniza volante o las escorias de alto horno, o riquezas naturales, como el metacaolín o la caliza. Adicionalmente al uso de cementos compuestos, podemos reducir la cantidad de materiales cementantes en el concreto mediante el uso de aditivos reductores de agua de alto rango y la sustitución parcial del cemento por adiciones minerales activas o inertes. Estos concretos ya son una realidad, ya existen referencias internacionales con su uso.

4 PROYECTOS DE REFERENCIA

4.1 Paralelo 45 Merignac

El proyecto ejecutado en 2020 consistió en la construcción de 180 pilas T-PILE® con diámetros de 52 y 62cm, con profundidad máxima de 21m y promedio de 11m (utilizando una perforadora F2200), como cimentación de un complejo formado por 5 edificios, un hotel, un centro de conferencias y un estacionamiento, ubicados dentro del recinto del aeropuerto de Burdeos *Mérignac*, Francia.

El suelo está formado por un depósito aluvial reciente del río *Garonne* dentro de una matriz areno arcillosa, con intercalaciones de arcillas y arenas -de conchas- carbonatadas, por debajo margas arenosas calcáreas de la formación *Faluns de Saucats* ($p_l = 2.4$ MPa).



Figura 8. Construcción de pilas T-PILE®. Paralelo 45 Merignac.

4.2 Bordeaux ZAC

El proyecto ejecutado en 2021 consistió en la construcción de 344 pilas T-PILE® con diámetros de 42 a 72cm, con profundidad máxima de 15m (utilizando una perforadora F2200), como cimentación de un complejo formado por 7 edificios con uso habitacional en Burdeos, Francia.

El sitio del proyecto está ubicado en el antiguo sitio de la SNCF en el sector de *Amédée*. La zona de estudio tiene formaciones de ladera caracterizadas por la presencia de arenas arcillosas y gravas, coluviones dispersos (espesor < 1m) sobre un lecho de roca caliza con potencial cárstico (calizas de “*Astéries*” o calizas de “*Archiacins*”), las cavidades de origen cárstico están vacías o llenas de arcilla o arena. La zona del proyecto es una zona de riesgo medio en cuanto a contracción y expansión de suelos arcillosos.



Figura 9. Planta de ubicación del proyecto Bordeaux ZAC.

4.3 Augny Centro de almacenamiento AMAZON

El proyecto ejecutado en 2020 está ubicado en la zona sur de la antigua base aérea de *Frescaty*, situada a pocos kilómetros al sur de *Metz*, Francia, consistió en la creación de una plataforma logística de más de 5.2ha, con un complejo de almacenamiento, locales técnicos y oficinas. La cimentación consistió en 1,200 pilas T-PILE® con diámetros de 52 a 62cm, con profundidad de 20m.

El suelo en el sitio está formado por limos de meseta que descansan sobre arcillas, o sobre un sustrato arcilloso-margoso. También se tienen rellenos formados por arcilla parda con grava y ladrillos, arcillas limo-arenosas pardas con algo gravas -ver Figura 10-



Figura 10. Perforación de prueba en los materiales de relleno.

5 CONCLUSIONES

El proceso constructivo T-PILE®, variante del procedimiento STARSOL®, permite mejorar las características mecánicas en términos de capacidad de carga geotécnica y reducción de volumen de concreto de las pilas de cimentación en comparación de los equipos CFA convencionales y de las pilas perforadas bajo lodo, mediante la creación de una nervadura helicoidal de concreto “diente”, con un paso regular a todo lo largo del fuste de la pila. El uso de pilas T-PILE® permite reducir el impacto al medio ambiente al reducir el consumo de concreto en un promedio del 30%.

Tanto la metodología de cálculo como el proceso constructivo están certificados y aceptados en códigos internacionales, además de que se cuenta con experiencias exitosas internacionales, principalmente en Europa. En los proyectos que se presentan la aplicación del T-PILE® fue una mejor alternativa técnica, económica con el beneficio adicional de favorecer el respecto al medio ambiente.

En resumen, el proceso constructivo de pilas de cimentación T-PILE® representa una oportunidad de optimización económica a mismo, o mejor, desempeño en términos de capacidad de carga geotécnica que los métodos tradicionales (CFA, perforación bajo lodo). También representa una reducción en el impacto en huella de carbono, lo cual no es menos importante ya que también debe ser una prioridad en los países de América Latina.

6 AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro reconocimiento y agradecimiento a Brenda MORALES, Dirección de Materiales de Cimentaciones Mexicanas, por el cálculo de la huella de carbono para los ejemplos que se presentaron -inciso 3.1-. También a Jeroni BOUDE, Presidente de Soletanche Bachy Fondations Speciales, por habernos compartido la información de los proyectos de referencia -inciso 4-.

7 REFERENCIAS

- Eurocode 7. *Application aux fondations profondes* (NF P94-262).
Goetz É. 2023. Sostenibilidad de las cimentaciones profundas: un reto de hoy con visión a futuro. *Revista Obras Subterráneas*, Asociación Mexicana de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas. Año 11, número 39, julio-septiembre 2023, páginas 14-17.
Soletanche Bachy Fondations Speciales. 2021. *Cahier des charges Particulier*. STARSOL®, STARSOL T-PILE®.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.