

SMART CELL: LA MEJORA PARA PILOTES PERFORADOS

SMART CELL: THE IMPROVEMENT FOR DRILLED SHAFTS

Mario Augusto Terceros Herrera; Antonio Marinucci; Mario Terceros Arce

Affiliation

¹Executive Director, INCOTEC S.A., Santa cruz, Bolivia, math@incotec.cc

²President, Advanced Foundation Solutions LLC, Nueva York, Estados Unidos (EEUU), antmarinucci@gmail.com

³Director, INCOTEC S.A., Santa Cruz, Bolivia, mta@incotec.cc

RESUMEN:

En este artículo se presentará la celda Smart Cell, que es un sistema de inyección de lechada cementicia de tipo cerrado que se une a la parte inferior de la armadura de acero de refuerzo en pilotes perforados, y actúa de manera similar a un gato hidráulico en pruebas de carga estática bidireccionales. Se instrumenta con tell tales a fin de monitorear la deformación durante la inyección, lo que permite generar una curva fuerza-movimiento para el 100% de los pilotes. A medida que se aplica una carga de compresión axial a la parte superior de un pilote perforado, el pilote se mueve hacia abajo en relación con el suelo in situ, donde la resistencia axial proporcionada por el suelo se moviliza primero en resistencia lateral y luego en resistencia por punta. No se puede lograr una resistencia máxima optimizada con pilotes perforados convencionales (es decir, sin inyectar en la punta) porque la resistencia lateral completa se logra con desplazamientos verticales muy pequeños, mientras que la resistencia total de la punta se logra con desplazamientos verticales relativamente grandes.

PALABRAS CLAVE: Inyección de punta, pre-carga, pre-movilización, desempeño, riesgo

ABSTRACT: In this article, we will introduce the Smart Cell, which is a closed-type cementitious slurry injection system that is attached to the bottom of reinforcing steel reinforcement on drilled piles, and acts similarly to a hydraulic jack in bi-directional static load testing. It is instrumented with tell-tales to monitor the deformation during injection, which allows the generating of a force-movement curve for 100% of the piles. As an axial compressive load is applied to the top of a drilled pile, the pile moves downward relative to the ground in situ, where the axial strength provided by the soil is mobilized first into lateral strength and then into tip strength. Optimized maximum strength cannot be achieved with conventional (i.e., non-tip injected) drilled piles because full lateral strength is achieved with very small vertical displacements, while total tip strength is achieved with relatively large vertical displacements.

KEYWORDS: Tip injection, pre-load, pre-mobilization, performance, risk

1.- INTRODUCCIÓN

A continuación se presentará una visión general, los principios básicos y la metodología de diseño de la post-inyección de la punta utilizando esta técnica. Se hará hincapié en los beneficios de esta tecnología en comparación con los métodos tradicionales de inyección de puntas. Utilizando las mediciones de la inyección de punta, se discutirá la premovilización de la resistencia axial y la carga inducida impartida en el fuste perforado y en el suelo debajo de la base y la deformación de la base durante la inyección.

A medida que se aplica una carga de compresión axial a la parte superior de un pilote perforado, el pilote se mueve hacia abajo en relación con el suelo in situ, donde la resistencia axial proporcionada por el suelo se moviliza primero en la resistencia lateral y luego en la resistencia de punta. No se puede lograr una resistencia máxima optimizada en fustes perforados (sin inyectar) porque la resistencia lateral completa se logra a desplazamientos verticales relativamente pequeños, mientras que la resistencia total de la punta se logra a desplazamientos verticales comparativamente grandes. Por lo tanto, debido a esta incompatibilidad de deformación, para lograr la resistencia máxima, no es realista ni correcto utilizar la resistencia lateral y de punta completas en el diseño de cimientos de pilotes perforados. Si se hace eso, los diseñadores estarán descuidando un componente o habrán

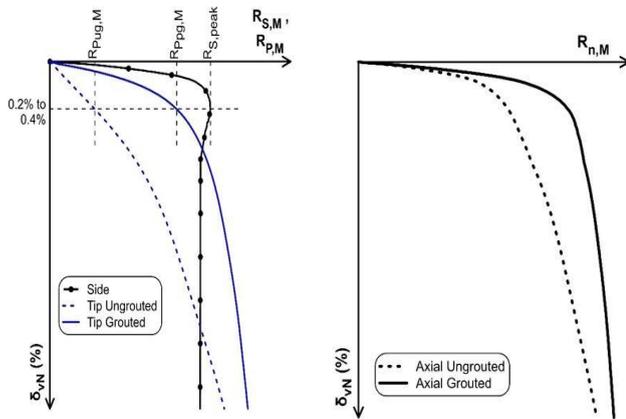
reducido las contribuciones relativas de la resistencia lateral y/o de punta. El comportamiento a largo plazo de un pilote perforado se rige por la(s) técnica(s) de construcción y la calidad de la mano de obra y experiencia aplicada para instalar el pilote. Dejando a un lado las preocupaciones de incompatibilidad de deformación, pueden manifestarse otros problemas como resultado del proceso de construcción, incluso con mano de obra de alta calidad, incluida la acumulación de sedimentos (es decir, condición de fondo blando) y el cambio en el estado de tensión (es decir, alivio de tensión) en la parte inferior del pilote.

Dado que requiere un movimiento vertical del pilote para movilizar su resistencia axial; con un exceso de acumulación de sedimentos y/o alivio de tensiones de las condiciones in situ, se requeriría una mayor magnitud de movimiento vertical para movilizar la resistencia axial que satisfaga los requisitos de diseño y garantice un comportamiento adecuado a largo plazo del pilote construido. (figura 1)

La post-inyección en la punta es una técnica utilizada para pre-movilizar la resistencia axial del extremo de un pilote perforado, así como para mitigar una condición

de fondo blando y alivio de tensión debido a la instalación. Esta técnica se utiliza para inyectar una lechada de cemento, bajo presión, debajo de la base de un pilote perforado a fin de mejorar su comportamiento cuando se somete a cargas

axiales de compresión. (Nota: la post-inyección de lechada en la punta no debe usarse en lugar de una ejecución adecuada y mano de obra de buena calidad en la construcción de un pilote perforado).



a) Resistencia lateral y de punta por separado b) Resistencia total con y sin inyección de punta

Figura 1. Mecanismo de mejora. Comparación de respuesta con y sin inyección de punta (Marinucci et al. 2020)

La post-inyección se logra utilizando un dispositivo de distribución de lechada de tipo abierto o cerrado que se incorpora en la parte inferior de la jaula de refuerzo de acero. Para los sistemas de tipo abierto (es decir, sistemas de manguito o tubo-manchete), la lechada se inyecta fuera de los tubos de suministro y en el suelo circundante. Por el contrario, para los sistemas de tipo cerrado (por ejemplo, Smart-Cells), la lechada está contenida dentro del dispositivo de expansión y no entra en contacto directo con el suelo. Independientemente del método, los objetivos clave de esta técnica son mejorar la rigidez del suelo, mejorar la resistencia nominal (es decir, el comportamiento de carga-desplazamiento) del pilote a la carga de compresión axial y alinear mejor las curvas de transferencia de carga a través de la movilización (precarga) de la resistencia final (Figura 1).

2.- COMPORTAMIENTO DE TRANSFERENCIA DE CARGA

En la Figura 2 se presentan los comportamientos generalizados de transferencia de carga de un pilote perforado (sin inyectar) cargado en compresión axial. La resistencia lateral de un pilote perforado movilizará su resistencia máxima después de un desplazamiento vertical normalizado, ΔD_{vN} , (es decir, desplazamiento, δ_v , dividido por el diámetro del pilote perforado, D_p) de aproximadamente 0.2% a 0.4%, independientemente del tipo de suelo. La resistencia por punta no se moviliza completamente hasta un D_{vN} de alrededor del 4% en ambos tipos de suelo. Para suelos cohesivos, esta es la máxima resistencia axial que se puede lograr. Para suelos sin cohesión, la resistencia axial continúa aumentando con el desplazamiento continuo (gobernado por la capacidad portante), y se utiliza un límite práctico para D_{vN} del 10%. Chen y Kulhawy (2002) informaron sobre la movilización de la resistencia axial en suelos competentes para diferentes

desplazamientos normalizados, y en la Tabla 1 se proporciona un resumen.

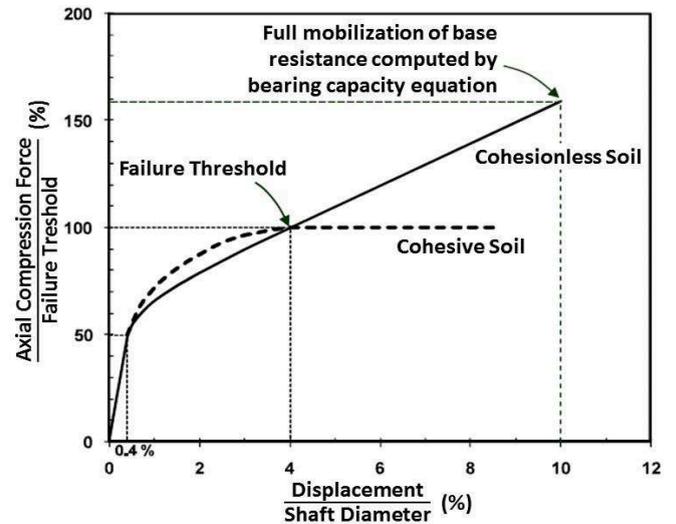


Figura 2. Curvas de carga-desplazamiento normalizadas para pilotes perforados en compresión axial (mod. según Brown et al, 2018)

Tabla1. Movilización de la resistencia axial de un pilote (sin lechada) encarga de compresión axial (según Chen y Kulhawy,2002)

Normalized Displacement	Mobilized Resistance in Cohesionless Soils			Mobilized Resistance in Cohesive Soils		
	Total Axial	Side (% of Total Axial)	End	Total Axial	Side (% of Total Axial)	End
0.4%	50%	90%	10%	50%	90%	10%
4%	100%	76%	24%	100%	76%	24%
10%	159%	76%	83%	--	--	--

3.- DESCRIPCIÓN GENERAL Y PRINCIPIOS BÁSICOS

Un Smart Cell (SC) es un dispositivo de post-inyección de tipo cerrado que está unido a la parte inferior de la jaula de refuerzo de acero de los pilotes perforados y actúa como un gato hidráulico para movilizar la resistencia final del pilote perforado independientemente del tipo de condición del suelo. (Figura 3)

El dispositivo SC en sí consta de placas de acero, superior e inferior, paredes de la celda y conexiones e implementos internos más instrumentos externos, como *tell tales* para la medición de deformaciones de la cabeza y base de la celda. A medida que la lechada se inyecta bajo presión en el dispositivo, la celda se expande empujando hacia arriba contra el pilote perforado y hacia abajo contra el suelo in situ debajo de la base del pilote y del dispositivo. Durante este proceso, se induce una fuerza bidireccional en el pilote perforado por encima y en el suelo por debajo, lo que da como resultado una premovilización o precarga de las resistencias laterales y de punta. (Fellenius et al)

Dado que la lechada está contenida (Figura 3), la carga bidireccional que se induce (P_{SC}) durante el proceso de lechada se puede calcular multiplicando la presión de inyección (p) por el área de la sección transversal del dispositivo (A_{SC}). La carga inducida es una función de la tensión in situ del suelo, el peso propio del fuste y la resistencia lateral disponible entre el fuste y el suelo circundante. Con esta técnica, la presión actúa en toda la base del dispositivo simultáneamente. En general, cuanto mayor sea la carga que se puede inducir a partir del proceso de inyección, mayor será la premovilización (precarga), mayor será el aumento de la rigidez del suelo y mayor será la mejora en el comportamiento que se puede lograr (Loehr et al, 2017).

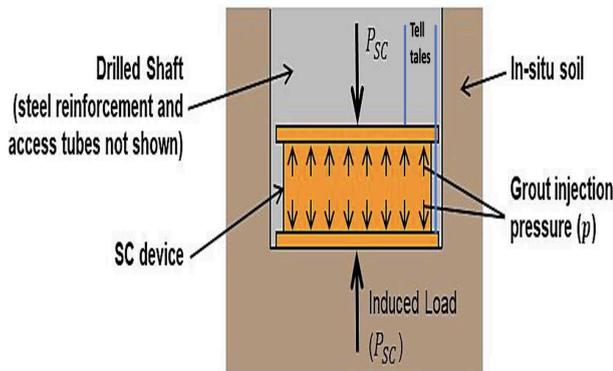


Figura 3. Representación gráfica de la post-inyección y la carga inducida

La magnitud del desplazamiento vertical permitido debido a la carga de compresión axial establece indirectamente la magnitud de resistencia axial que se puede movilizar para ese desplazamiento dado (es decir, condiciones de servicio). Si el desplazamiento permitido es menor que el requerido para movilizar completamente la resistencia axial, se puede usar post-inyección para lograr e inducir una fuerza bidireccional necesaria para pre-movilizar la resistencia axial requerida.

Para la post-inyección con este dispositivo de tipo cerrado, se utilizan las curvas de carga-desplazamiento de Chen y Kulhawy (2002) y descritas por Brown et al (2018) para calcular la presión de inyección objetivo (p_t) basadas en el desplazamiento admisible posterior a la construcción prescrito para el pilote perforado. El procedimiento general utilizado para estimar la presión objetivo (p_t) se describe en Marinucci et al (2020). Incluso con el mejor modelado y la más alta calidad de construcción, la presión estimada de p_t no está garantizada, ya que p_t depende de varios factores, incluido el tipo de suelo, el estado de tensión real in situ, la resistencia al corte de los suelos y la fuerza de reacción disponible (es decir, el peso propio del pilote perforado más la resistencia lateral).

Cuando se realiza la post-inyección, la secuencia general de operaciones y la respuesta posterior se describen a continuación y en la 4. Después de que se perforó y se insertó el refuerzo de acero (y los accesorios) más la Smart Cell, el hormigón se coloca y se deja fraguar. La inyección de lechada presurizada induce una carga bidireccional (P_{SC}) dentro del dispositivo, que moviliza simultáneamente la resistencia lateral negativa para resistir la carga hacia arriba y la resistencia de punta positiva para resistir la carga hacia abajo (Figuras 4b a 4d).

Durante el proceso de inyección, la resistencia lateral se moviliza primero, que junto con el peso propio del fuste, reacciona contra la fuerza ascendente y facilita la premovilización o precarga del suelo in situ debajo del dispositivo. Para garantizar el control de la lechada y su efecto sobre el comportamiento del pilote perforado, se miden varios parámetros en función del tiempo durante toda la operación de lechada como parte de los criterios de terminación y el programa general de control de calidad.

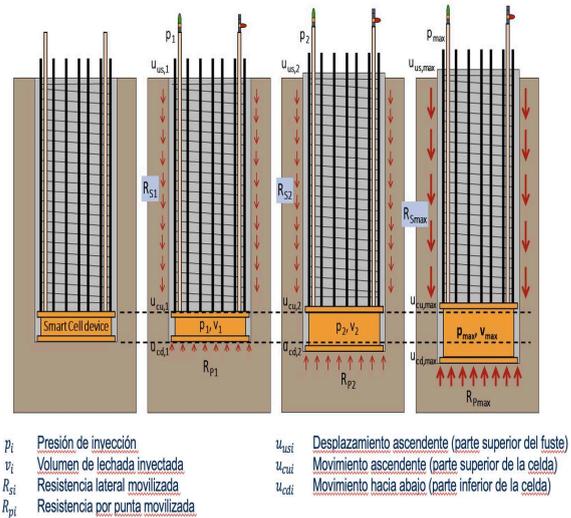


Figura 4. Secuencia generalizada: (a) instalación en el pozo y colocación de hormigón, (b) inicio de la inyección, (c) etapas intermedias de inyección, y (d) inyección completada

La relación entre la carga inducida (P_{SC}) y el desplazamiento vertical medido proporciona información valiosa sobre el comportamiento durante la inyección y para estimar el cambio en la rigidez (o módulo) y la resistencia final unitaria del suelo debido a la inyección (Figura 5). Después de que se ha inyectado el volumen neto (llenado de la celda), la presión de inyección (o carga inducida) requerida para iniciar la expansión de la celda es igual al menor valor entre la reacción del peso propio del fuste junto con la resistencia lateral por encima de la celda y la resistencia máxima por punta debajo de la celda.

4.- POST-INYECCION DE PUNTA: IMPLEMENTACIÓN Y RESPUESTA

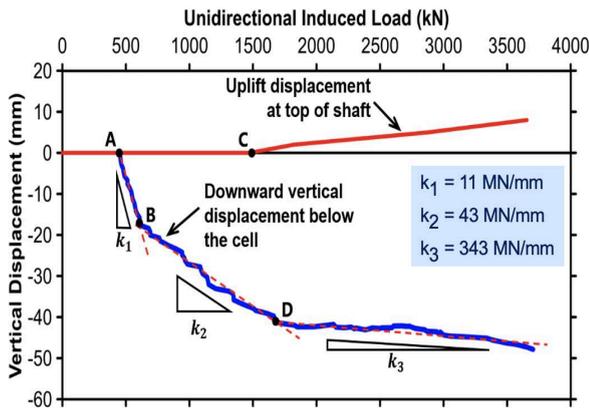


Figura 5. Ejemplo representativo de la carga inducida frente al desplazamiento vertical durante la inyección y cambio de rigidez (Marinucci et al. 2021)

5 MÉTODOS DE CÁLCULO DE LA PRESIÓN OBJETIVO ($p_{g,t}$)

Los métodos de cálculo se basan en cuál debe ser la presión objetivo durante la inyección, para alcanzar a movilizar las fuerzas necesarias que garanticen el adecuado aumento de rigidez del sistema, la pre-deformación requerida y el incremento en la resistencia de cada pilote.

Si bien existen métodos confiables para diseñar un sistema eficaz de post-inyección de la punta, es fundamental comprender que estos métodos no garantizan los valores en el campo, al igual que la inmensa mayoría de métodos para el diseño de otras estructuras geotécnicas.

La presión objetivo depende de varios factores

-Tipo de suelo

-Fuerza de reacción superior (es decir, peso propio del pilote perforado + resistencia lateral)

-Fuerza de reacción inferior (es decir, resistencia de la punta debajo del pilote perforado)

Existen dos 2 enfoques para estimar $p_{g,t}$ basado en el trabajo publicado por O'Neill & Reese (1999), Chen & Kulhawy (2002) y Brown et al (2018), y de acuerdo con AASHTO§10.8.3.5

1: Basado en las fuerzas de reacción disponibles

2: Basado en un asentamiento permisible posterior a la construcción

El proceso de cálculo es el siguiente:

Enfoque 1- Basado en las fuerzas de reacción disponibles

1. Calcular $R_{n,S}$ y $R_{n,P}$ asumiendo la movilización completa (R_S , máx y R_P , máx) basado en las guías y los métodos aplicables

2. Basado en la geometría del fuste dada (D_p y L_p), calcule el peso propio del fuste (W_p) sobre la Smart Cell

3. Calcular las fuerzas de reacción disponibles por encima y por debajo del dispositivo de distribución de lechada:

$$F_{R,u} = R_{n,s} + W_p$$

$$F_{R,d} = R_{n,p}$$

4. Estimar la presión de inyección máxima alcanzable por encima y por debajo de la Smart Cell:

$$p_{t,down} = \frac{F_{R,d}}{A_{cell}}$$

$$p_{t,up} = \frac{F_{R,u}}{A_{cell}}$$

5. Estimar $p_{g,t}$

$$p_{g,t} = \min(p_{t,up}, p_{t,down})$$

Enfoque 2 – Asentamiento admisible posterior a la construcción

Calcular $R_{n,S}$ y $R_{n,P}$ asumiendo la movilización completa (R_S , máx y R_P , máx) basado en las guías y los métodos aplicables
Basado en la geometría del fuste dada (D_p y L_p), calcule el peso propio del fuste (W_p) sobre la Smart Cell

Para δ_v prescrito, aceptable y basado en el tipo de suelo aplicable dentro de una distancia de 2-3 D_p por debajo de la base del fuste, calcule la resistencia axial movilizada ($R_{n,M}$) utilizando las siguientes ecuaciones y figuras (Brown et al., 2018) (Figura 6)

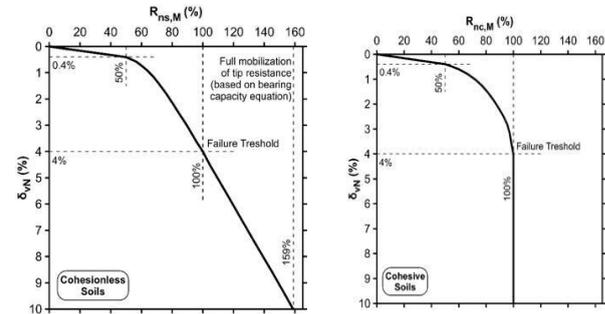


Figura 6. Gráficos Brown et al.

Calcular la presión de inyección objetivo basada en el desplazamiento

$$p_{t,d} = \frac{Q_{dn} + W_p - R_{n,M}}{A_{cell}}$$

Calcule las fuerzas de reacción disponibles por encima y por debajo del dispositivo de distribución de lechada:

$$F_{R,u} = R_{n,S} + W_p \quad F_{R,d} = R_{n,P}$$

Estimar la presión de inyección máxima alcanzable por encima y por debajo de la SC:

$$p_{t,down} = \frac{F_{R,d}}{A_{cell}}$$

$$p_{t,up} = \frac{F_{R,u}}{A_{cell}}$$

Estimar $p_{g,t}$

$$p_{g,t} = \min(p_{g,t,d}, p_{g,t,up}, p_{g,t,down})$$

6 HISTORIA DE CASOS

Durante la última década, las cimentaciones de pilotes perforados para estructuras de puentes en Bolivia se han construido con un diámetro de 1200 o 1500 mm (4 o 5 pies) utilizando el método de entubado y/o húmedo con o sin un fluido de soporte de perforación (generalmente, bentonita). Más recientemente, el uso de post-inyección se ha incrementado para pre-movilizar la resistencia final, para limitar el desplazamiento vertical posterior a la construcción de la estructura y para reducir la incertidumbre con el comportamiento a largo plazo. El enfoque de diseño para la post-inyección en Bolivia ha sido determinar la presión de inyección

mínima para satisfacer los criterios de desplazamiento posterior a la construcción del proyecto. Durante la

implementación de la inyección, sin embargo, la presión de inyección se incrementa en incrementos hasta el máximo práctico mientras se ajusta a los criterios de terminación de la inyección.

La presión de inyección objetivo se calcula para la peor condición en cada estructura de puente. El diámetro exterior y la altura previa a la inyección del dispositivo de lechada fueron de aproximadamente 95 cm y 31 cm respectivamente. Por su parte, en Paraguay se han instalado varios cientos de SC de pequeño diámetro (entre 30 cm y 50 cm) para pilotes perforados entre 35cm y 60 cm.

Para pilotes de gran diámetro, después de que el concreto en el pilote perforado alcanzó una resistencia a la compresión no confinada mínima de aproximadamente 10 MPa (1.450 psi) y/o cuando el nivel de agua dentro del río lo permitió continuar, la inyección de la celda se realizó individualmente para cada pilote perforado. Para pilotes de pequeño diámetro la inyección se inicia cuando la resistencia cilíndrica del hormigón es mayor a 20 MPa.

En cada caso se realizó el monitoreo y registro de la presión de inyección, el volumen de lechada inyectado y la velocidad de flujo de la lechada en tiempo real utilizando transductores conectados a un sistema de adquisición de datos y se observó en una computadora portátil. El levantamiento y los movimientos de expansión del pilote perforado y el SC se midieron mediante *tell tales* y extensómetros analógicos en tiempo real.

Caso Puente Urubó 2 (Terceros et al., Marinucci et al.)

La nueva estructura del puente de 5 vanos, Urubó 2, se diseñó para el tráfico de vehículos para cruzar el río Pirai, en la ciudad de Santa Cruz de la Sierra, Bolivia, adyacente al puente Urubó 1. Se anexa un esquema de la geotecnia del lugar. (Figura 7)

El nuevo puente tiene aproximadamente 12 m (40 pies) de ancho y 420 m (1380 pies) de largo. El puente está sostenido por cinco pilas y dos estribos. Cada vano es de aproximadamente 100 m de largo. Cada pila está soportada por 7 pilotes de 1200 mm de diámetro y longitud variable de 30 m. Cada estribo está soportado por 3 pilotes alineados de 1200 mm de diámetro y 25 m de longitud. (Figura 8)

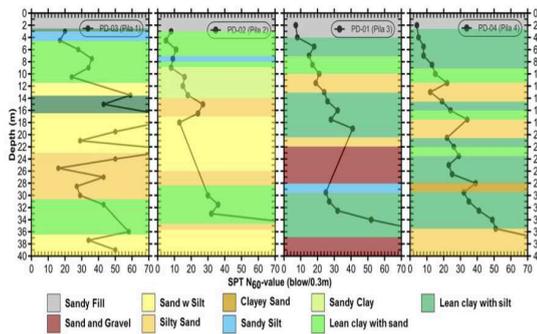


Figura 7. Geotecnia del lugar

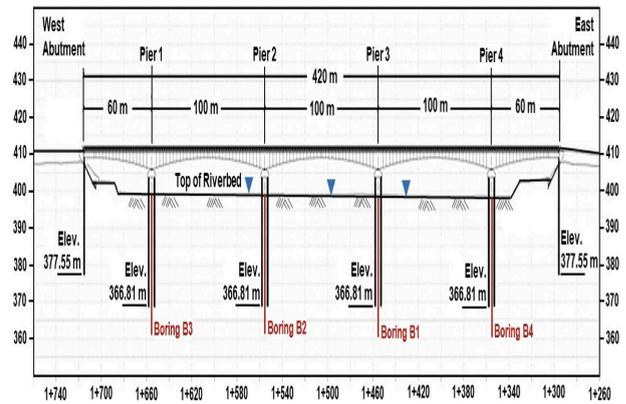


Figura 8. Perfil en elevación del puente Urubó 2 (Terceros et al.)

La resistencia axial nominal (R_n) de cada pilote perforado fue de aproximadamente 400 toneladas (3925 kN). El proyecto requería un asentamiento vertical máximo posterior a la construcción permitido ($\delta_{v,allow}$) de 30 mm, resultando en un desplazamiento normalizado post-construcción de $D_{vn}=2.5$. Según el procedimiento discutido en Marinucci et al (2020), la presión objetivo mínima (pero escenario) requerida se estimó en aproximadamente 10.3 bar (1025 kPa)

Se proporciona un resumen de las mediciones y el comportamiento de la inyección para los cuatro pilares y los dos estribos en la Tabla 2.

Tabla 2.- Mediciones y resultados de las inyecciones (Terceros et al.)

Location	Desc.	Max. pressure achieved (bar)	Max. downward displacement		$\frac{P_{max}}{P_i}$	Unidirectional induced load (kN)	$\frac{P_{sc}}{P_{d,av}}$
			(mm)	(Norm.)			
West abutment	Range	22.0-59.2	65.0-98.2	5.4%-8.2%	214%-575%	1977-4534	50%-116%
	Average	40.6	81.6	6.8%	394%	3255	83%
	Std Dev	26.3	23.5	2.0%	256%	1808	46%
Pier 1	Range	29.3-57.3	8.0-58.2	0.9%-3.0%	284%-556%	2383-4478	61%-114%
	Average	48.6	24.2	2.1%	472%	3814	97%
	Std Dev	9.9	18.1	1.5%	96%	737	19%
Pier 2	Range	35.1-58.0	9.0-26.4	1.3%-2.2%	341%-563%	2907-4526	74%-115%
	Average	46.5	15.9	1.8%	451%	3674	94%
	Std Dev	7.9	5.9	0.5%	77%	570	15%
Pier 3	Range	31.7-52.3	3.0-40.9	0.2%-2.1%	308%-508%	2552-4123	65%-105%
	Average	42.6	17.0	1.0%	414%	3390	86%
	Std Dev	6.0	12.6	1.1%	58.4%	463	12%
Pier 4	Range	27.3-44.8	16.3-32.0	1.4%-2.3%	265%-435%	2239-3595	57%-92%
	Average	34.8	22.8	1.8%	338%	2834	72%
	Std Dev	6.8	5.9	0.5%	66%	501	13%
East abutment	Range	16.8-34.8	17.3-34.0	1.4%-2.8%	163%-338%	1538-2774	39%-71%
	Average	27.2	24.8	2.1%	264%	2247	57%
	Std Dev	9.3	8.5	0.7%	91%	638	16%

Como se puede ver, hubo diferencias notables, entre todos los pilotes, en las presiones de inyección logradas y el desplazamiento resultante debajo del dispositivo SC, incluso para aquellos dentro de distancias cortas entre sí en el mismo pilar.

En la Figura 9 se muestran resultados gráficos de las curvas de inyección de algunos pilotes elegidos en dos cabezales de pilas (pila 3 y pila 4). En esos gráficos se observa las diferencias en la respuesta de la inyección debido a las

condiciones geotécnicas heterogéneas del lugar y los diferentes espesores de detritus generados durante la construcción.

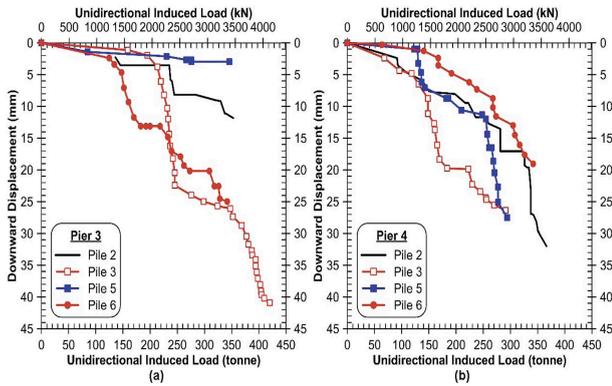
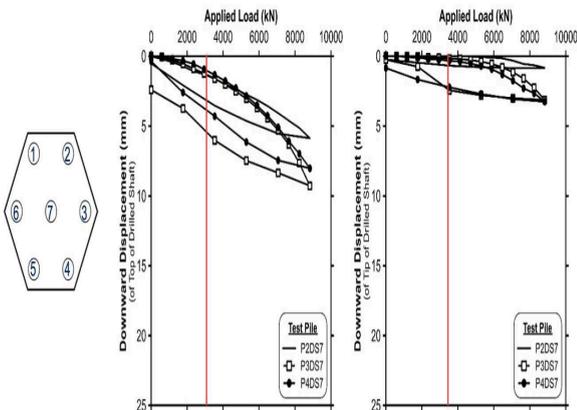


Figura 9. Curvas carga-deformación de las celdas SC en distintos pilotes

Una vez instalados e inyectados todos los pilotes, se procedió a ejecutar 3 ensayos de carga estáticos convencionales (desde la cabeza de los pilotes) en los pilotes número 7 de las pila 2, 3 y 4. En la figura 10 se muestran las curvas carga-deformación, tanto para la cabeza como para la punta del pilote. De esta manera se aprecia claramente la magnitud de la mejora generada por la celda SC en el comportamiento del pilote. Para un proyecto basado en esta información, los pilotes podrían haber trabajado con cargas de servicio al menos un 80% mayor.



a) Movimientos medidos desde la cabeza del pilote

b) Movimientos medidos desde la punta del pilote

Figura 10. Curvas carga-movimiento de pilotes sometidos a ensayos de carga estáticos (Terceros et al)

CONCLUSIONES

En la tabla 3 se presenta un resumen de los beneficios de esta tecnología en comparación con el sistema de inyección abierta y el sistema convencional sin inyección de punta. Es importante destacar que además de lo indicado en la Tabla 3, se debe considerar el beneficio respecto de la huella de carbono que produce esta tecnología, ya que por su uso se reduce de forma muy marcada el consumo de hormigón, la cantidad de desechos de la excavación, el transporte asociado a ambos eventos, la velocidad de ejecución de la obra (tiempo de equipos y personas) y la economía final (comparación fácil del costo unitario en \$/t resistida con celda y sin celda).

Tabla 3 – Resumen de beneficios de la SC

EFFECTO CONSEGUIDO	POST-INYECCION CON SC	POST-INYECCION SIN SC	SIN POST-INYECCION
Compactación de fondo blando	Sí, con medición de espesor de fondo blando	Sí, sin certeza del espesor mejorado	NO
Precarga del pilote	Sí, con medición de valor de pre carga	Sí, se desconoce valor de pre carga	NO
Se pre moviliza la resistencia de punta. Mejora rigidez	Sí, se conoce el valor	Sí, no se conoce el valor	NO
Permite optimizar diseño y optimizar geometría y cantidad de pilotes. Menor plazo y costo	Sí	Parcialmente	NO
Alto control de calidad en 100% de pilotes	Sí	Parcialmente	NO

En la Figura 11 se muestran dos modelos de Smart Cell: para diámetro mayor a 600 mm (a) y para diámetro menor a o igual 600 mm (b)



Figura 11 (a).- Celda para diámetro mayor a 600 mm (Murillo et al.)

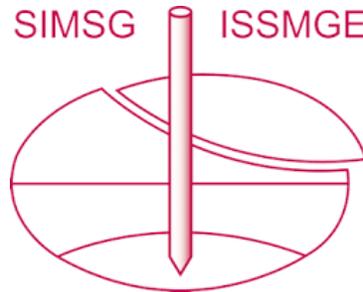


Figura 11 (b) Celda para diámetro menor o igual a 600 mm (Paniagua et al)

BIBLIOGRAFIA

- Chen.Y.J; Kulhawy, F. H.;Evaluation of Drained Axial Capacity for Drilled Shafts – ASCE 2002
- Fellenius B H, Ann S T. Combination of O-cell test and conventional head-down test. In: Proceedings of the Art of Foundation Engineering Practice Congress (GSP 198). Virginia, USA: American Society of Civil Engineers
- Fellenius B H, Terceros H. M, Mario Terceros A., K. Rainer Massarsch, Alessandro Mandolini , Static response of a group of 13 piles tested simultaneously. XVI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering – Cancun – Mexico
- FHWA, Evaluation and Guidance Development for Post-Grouted Drilled Shafts for Highways
- Loehr, J.E., Marinucci, A., Hagerty Duffy, P., Gómez, J., Robinson, H., Day, T.J., Boeckmann, A.Z., and Cadden, A.W. (2017). Evaluation and Guidance Development for Post-Grouted Drilled Shafts for Highways, Report No. FHWA-HIF-17-024, Federal
- Marinucci, A., Mario Terceros H., Mario Terceros A., Tip Post-grouting and Premobilization of Resistance of Drilled Shafts using Smart- Cells at Two Bridge Structures in Bolivia. IFCEE 2021, Dallas- Texas
- Marinucci, A., Terceros Herrera, M., and Terceros Arce, M. (2020). “Improvement of Toe Resistance of Drilled Shaft Foundations using Smart Cells.” Proc. of the 45th Annual Conference on Deep Foundations. National Harbor, MD
- Marinucci, A., Terceros Arce, M., and Terceros Herrera, M. (2021). “Tip Post-grouting using Smart Cells at Urubó Bridge” 6th GeoChina International Conference. Nanchang, China.
- Marinucci, A., Terceros Herrera, M., and Terceros Arce, M. (2021). “Tip Post-grouting using Smart-Cells of 126 Drilled Shafts at Two Bridges in Bolivia.” International Foundations Congress and Equipment Exposition (IFCEE). Dallas, TX.
- Murillo, T., Design and Construction of Cast-in-Place Piles Using Toe- Grouting Cell. Application in Bolivian Rivers.) Proceedings 3rd, CFPB (Congreso Internacional de Fundaciones Profundas de Bolivia)
- Osterberg J O. New device for loading testing driven piles and drilled shaft separate friction and end bearing. In: Proceedings of International Conference on Piling and Deep foundations. London, UK: A.A. Balkema,
- Osterberg J O, Hayes U A. The Osterberg load cell as a research tool. Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. IL, USA: A.A. Balkema, 2001
- Terceros A., M. , Terceros H., M. , The use of Expansion Devices for Deep Enhancement in Sedimentary Soils. 4o Simposio Internacional De Cimentaciones Profundas CDMX, México
- Randolph, M., Considerations in the design of piles in soft rock , Geotec Hanoi
- Paniagua, W., Terceros H., M. Elvira, A. Instrumentación de Micropilotes con Fibra Óptica. 6.º Simposio Internacional de Cimentaciones Profundas y Mejoramiento de Suelos. Geo Institut, DFI, SMIG

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.