

Medición in-situ de deformaciones en micropilotes de concreto, usando instrumentación con fibra óptica

In-situ strain measurement of concrete micro-piles under loading using distributed fiber sensing systems

Walter Iván Paniagua Zavala & Asael Elvira Martínez

Pilotec, México, wpaniagua@pilotec.com.mx

Mario Terceros

Incotec, Bolivia

RESUMEN: Se aborda la experiencia en la instrumentación de micropilotes, utilizando tecnología de fibra óptica e instrumentos analógicos. Aunque no es común instrumentar micropilotes sometidos a ensayos de compresión o tensión, donde se mide la fuerza y deformación en la cabeza del elemento, es importante destacar que, en aquellos casos donde las pruebas de carga puedan optimizar los diseños, resulta altamente conveniente conocer la distribución de los esfuerzos a lo largo del fuste; esto permite comprender de manera integral el funcionamiento de los pilotes, tanto en la fricción como en la punta. La práctica tradicional de instrumentación emplea strain gauges discretos que permiten conocer las microdeformaciones a ciertas distancias. Sin embargo, la instrumentación con fibra óptica posibilita la obtención de microdeformaciones de manera prácticamente continua, lo que se traduce en un nivel de detalle significativamente mayor en comparación con los métodos convencionales. En este estudio, se presentan y analizan los resultados de la instrumentación realizada en tres micropilotes ubicados en la Ciudad de México. Los datos obtenidos con la instrumentación de fibra óptica demuestran su eficacia en la obtención de información detallada y precisa sobre el comportamiento de los micropilotes, lo que facilita la optimización de los diseños y la toma de decisiones en proyectos de construcción.

KEYWORDS: Micropilote, fibra óptica, prueba de carga.

1 INTRODUCCION

La fibra óptica es una guía de onda en forma de hilo de material altamente transparente diseñado para transmitir información a grandes distancias utilizando señales ópticas. Normalmente, es utilizada en telecomunicaciones y en la medicina. Los circuitos de fibra óptica son filamentos de vidrio (compuestos de cristales naturales) o plástico (cristales artificiales) del espesor de un cabello (entre 10 y 300 micrones), Figura .1. Llevan mensajes en forma de haces de luz que pasa a través de ellos de un extremo a otro, donde quiera que el filamento vaya (incluyendo curvas y esquinas) sin interrupción.

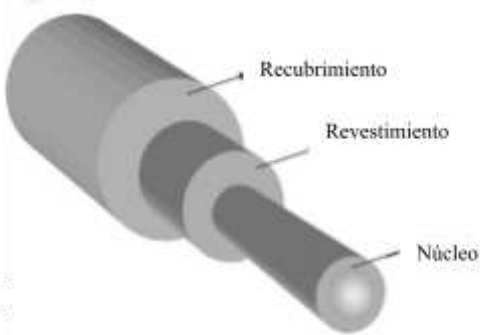


Figura 1. Estructura de una fibra óptica convencional.

Las fibras ópticas pueden ahora usarse como los alambres de cobre convencionales, tanto en pequeños ambientes autónomos (tales como sistemas de procesamiento de datos de aviones), como en grandes redes geográficas (como los sistemas de largas líneas urbanas utilizados por compañías telefónicas) (Rodríguez 2009). Para el caso de las cimentaciones profundas, las mediciones con fibra óptica permiten medir perfiles de deformaciones prácticamente en el 100% de la longitud de la cimentación, pudiendo obtener curvas de transferencia de carga vs la profundidad, aportando información importante para determinar la capacidad de carga de una pila. En este artículo, se muestran los resultados e interpretación de las lecturas obtenidas de sistemas de instrumentación conformado por cables de fibra óptica para medición de microdeformaciones DFOS (*Distributed Fibre Optic Sensing*) en tres micropilotes con diferentes características:

- Micropilote sencillo
- Micropilote con celda bidireccional en la punta
- Micropilote con *expander body* en la punta

Se seleccionaron estos tres tipos de micro pilotes por dos razones principales: 1) son tres soluciones prácticas y usuales en varios países de Latinoamérica y 2) como cada uno tiene una distribución de esfuerzos diferente tanto durante la construcción como durante los ensayos de carga, con la instrumentación utilizada estas diferencias se han podido medir.

Adicionalmente, y solo en el micropilote con celda bidireccional, se instalaron dos sensores de fibra óptica puntuales FBG (*Fiber Bragg Grating*), para medir deformación unitaria en dos puntos, y

tres sensores para medir temperatura durante el fraguado del concreto.

2 ELEMENTOS DE INSTRUMENTACIÓN CON FIBRA OPTICA

2.1 Cables y sensores

En los tres micropilotes, los principales instrumentos que conformaron la instrumentación con fibra óptica fueron los cables siguientes:

- ODISi/*Nerve*; de origen polaco, mide deformación unitaria continua.
- LIOS/*Nanzee*; de origen asiático, mide deformación unitaria continua.
- Sensores FBG-*Sylex*; mide deformación unitaria, puntualmente.
- Sensores FBG-*Micron Optics*; mide temperatura, puntualmente.

A continuación, se describen brevemente estos instrumentos.

2.2 Características del cable ODISi/*Nerve*

Se trata de un cable de origen polaco, compuesto por un rango de tensión de 4% y elasticidad de $E=3$ Gpa, el cual permite medir deformaciones precisas a lo largo de toda su longitud; tiene alta sensibilidad y precisión a lecturas de tensión y buena adherencia al concreto. Cuenta con una rigidez baja que permite que sea instalado con relativa facilidad, (Epsilon 2023). En la Figura 2, se presenta este instrumento.



Figura 2. Cable DFOS ODISi/*Nerve*.

2.3 Características del cable LIOS/*Nanzee*

Este cable, de origen asiático, se encuentra protegido por una serie de hilos de metal que lo rodean, lo que mejora su resistencia a la tensión; es adecuado para medir deformaciones de las estructuras de concreto, como pilas coladas in situ y muros de contención; es adaptable a cualquier estructura de manera similar a un cable con estructura de metal. Debido al refuerzo interno, resiste impactos como los provocados por la caída del concreto y de los agregados y resulta adecuado para condiciones de trabajo rudo. Tiene una textura exterior roscada que ayuda a tener mejor adherencia al

concreto, debido a su facilidad de manejo, también puede ser fácil de instalar. En la Figura 3, se presenta este instrumento.

Figura 3. Cable DFOS LIOS/*Nanzee*.

2.4 Características del sensor FBG-*Sylex*

Estos sensores son metálicos, con dimensiones aproximadas de 17 cm de largo y dos discos de apoyo laterales de 3.45 cm de diámetro cada disco; permiten obtener las deformaciones en puntos específicos. En la Figura 4, se muestra el sensor FBG-*Sylex*.

Figura 4. Sensor FBG *Sylex*.

2.5 Características del sensor FBG-*Micron Optics*

Sensor que obtiene la temperatura en puntos específicos, con dimensiones aproximadas de 3.0 cm x 2.0 cm; se colocó adosado a la estructura de acero del micropilote, en la Figura 5, se presenta este sensor.

Figura 5. Sensor FBG-*Micron Optics*.

2.6 Sistemas de adquisición de datos

2.6.1 Sistema de adquisición de datos Cable LIOS/Nanze.

El sistema de adquisición va de la mano de la tecnología de medición patentada de Brillouin LIOS PRE.VENT-DSM (*Distributed Structure Monitoring System*), que permite medir de manera autónoma, apoyado de una unidad de SSD (*Solid State Drive*) para el almacenamiento de datos; este sistema de adquisición monitorea las deformaciones y temperaturas. En la Figura 6, se muestra el equipo de medición.

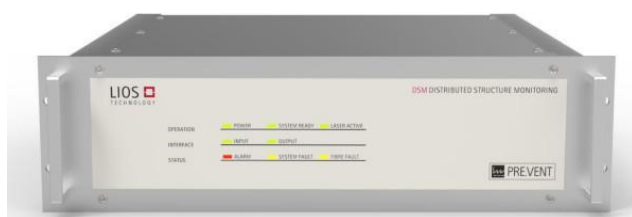


Figura 6. Sistema de adquisición de datos LIOS PRE.VENT-DSM.

2.6.2 Sistema de adquisición de datos para Cable ODISI/Nerve.

Realiza toma de lecturas para pruebas de tensión o temperatura, mediante mediciones por medio de un solo sensor de fibra de alta definición; los datos pueden mapear el contorno de la sección. El lector es flexible, de bajo perfil, no requiere fuente eléctrica; en la Figura 7, se muestra este dispositivo.



Figura 7. Sistema de adquisición de datos ODISI/Nerve.

2.6.3 Sistema de adquisición de datos para sensores térmicos y sensores de deformación FBG-Stylex y Micron Optics.

Este equipo está diseñado para una operación en campo de largos periodos para varios sensores FBG trabajando simultáneamente; todas las configuraciones del sistema, cálculos

del sensor, almacenamiento y avisos, se ejecutan en una PC externa o en un módulo de procesador del sensor. En la Figura 8, se muestra este dispositivo.

3 PRUEBAS DE CARGA EN MICROPILOTES

Se realizaron seis pruebas de carga (tres de compresión y tres de tensión) en los tres micropilotes descritos anteriormente. En este trabajo se muestran los resultados únicamente de las pruebas de compresión.

Figura 8. Sistema de adquisición de datos FBG-Stylex y Micron Optics.

El sitio de las pruebas se encuentra ubicado en Naucalpan de Juárez, Estado de México el cual forma parte del proyecto “Campo de pruebas IIUNAM, para estudio de propiedades térmicas y pilas de energía”, (Paniagua 2023).

3.1 Información geotécnica disponible

La campaña de exploración consistió en la ejecución de dos sondeos de penetración estándar a 25 m de profundidad. La exploración continuó con la ejecución de un sondeo selectivo adicional (SS-01), para recuperar muestras inalteradas con barril *Soletanche* en suelos firmes, y concluyó con la perforación de un barreno donde se ejecutaron cinco pruebas de ficómetro (PHI) y cinco ensayos con presiómetro de Menard (PMT); a partir de estos sondeos, se distinguen las unidades geotécnicas principales que se describen a continuación:

Rellenos (0.0m a 0.60m): Superficialmente, se encuentra un relleno de aproximadamente 60cm de espesor conformado principalmente por material de construcción, arenas gruesas y limos de color café. UG-A (0.60m a 13.0m). Por debajo de los rellenos se reconoce un estrato conformado por arena media limosa color café grisáceo. UG-B (13.0m a 25.23m): subyaciendo a la UG- A, se observa arena media a gruesa color café grisáceo poco limosa y fuertemente cementada, En la Figura 9 se muestra el perfil estratigráfico, de uno de los sondeos continuos de penetración estándar.

3.2 Pruebas de carga a compresión

Se realizaron pruebas de carga de compresión en cada uno de los

micropilotes de 6.50 m de profundidad y 0.3 m de diámetro. Los

Tabla 1. Cargas programadas en pruebas de carga

micropilotes se armaron con cuatro varillas del N°.6 y estribos del N°.2, inyectados con lechada agua-cemento en proporción 1:2 (en peso). Al micropilote sencillo (S) se aplicó una etapa de

Tipo	Condición de prueba	Diámetro del pilote	Carga máxima programada	N° de pilas de reacción
------	---------------------	---------------------	-------------------------	-------------------------

inyección, y a los de *expander body* (EB) y con celda bidireccional (BD), dos etapas de inyección. Los detalles del procedimiento

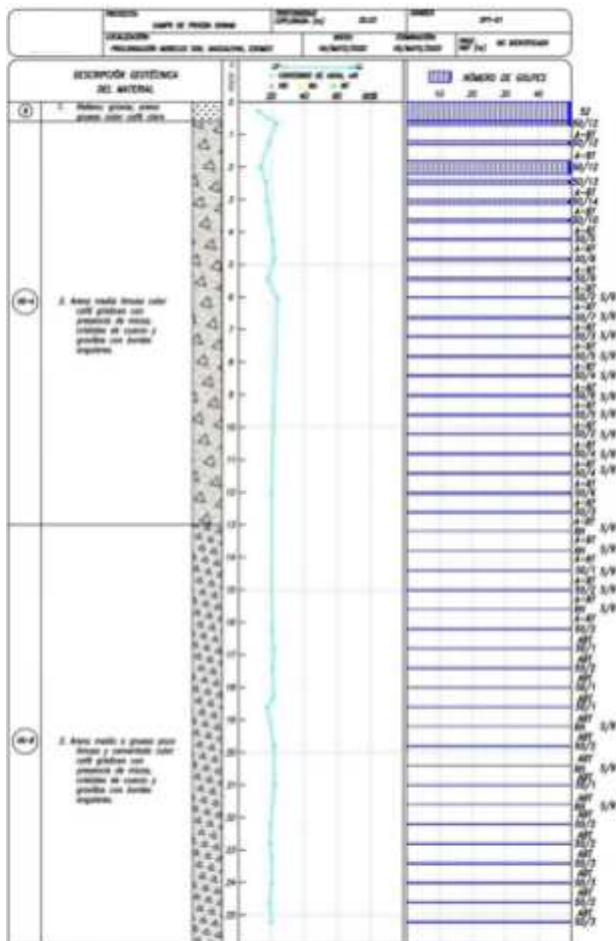
	m	t
EB	126 144	2

S

constructivo de cada micropilote se pueden consultar en (Paniagua 2017).

Figura 9. Sondeo SPT-1.

Las cargas de reacción se tomaron con pilas de cimentación de 80 cm de diámetro de 11.50 m de profundidad, armadas con acero de refuerzo, utilizando un arreglo de dos pilas de reacción por cada micropilote de prueba. Con el fin de programar las cargas máximas en cada prueba de carga, se realizaron cálculos analíticos para determinar la carga última, para cada condición de micropilote. El cálculo detallado para cada tipo de micropilote se encuentra fuera del alcance de este trabajo. En la Tabla 1, se presentan las cargas máximas programadas para cada tipo de micropilote.



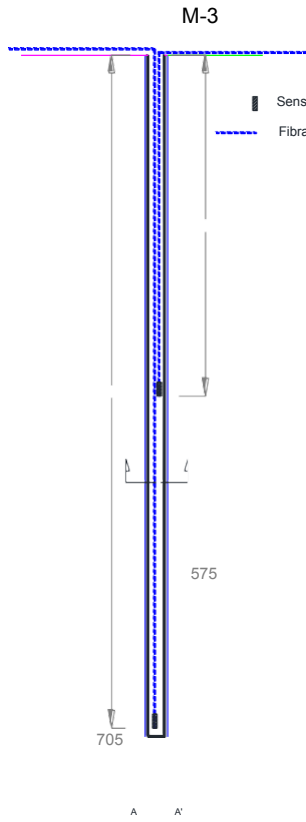
La prueba de carga a compresión se realizó utilizando el procedimiento de carga rápida (ASTM 2017):

Procedure A: Quick Test; el cual permitió definir la carga última que soportó cada micropilote, aplicando la carga en incrementos pequeños en intervalos de tiempo constante. La idea fue definir, con la mayor precisión posible, la curva carga-desplazamiento de cada prueba.

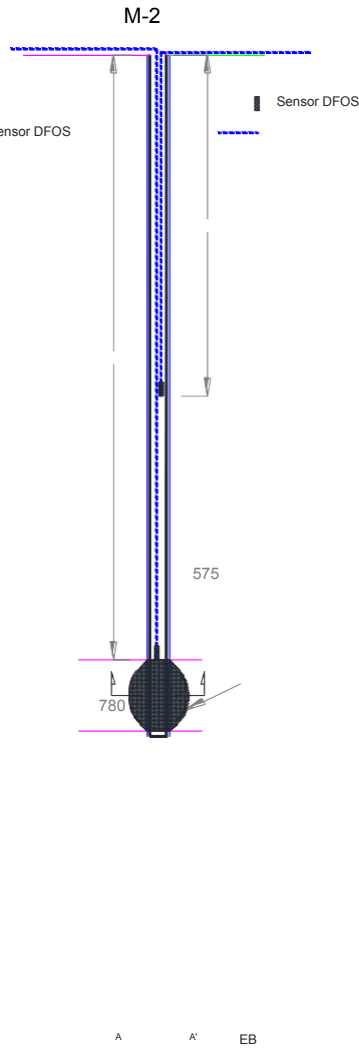
En este caso, se eligió la aplicación de carga con base en incrementos de carga en intervalos de tiempo constante equivalentes al 5% de la carga máxima, los cuales se aplicaron en intervalos constantes de 15 min, tomándose la lectura de todos los instrumentos, en cada incremento, a los 2, 5, 10, 12 y 15 minutos; posteriormente, se mantuvo al menos 1 hora la carga máxima, y 1 hora en el último decremento para registrar rebote elástico de la pila totalmente descargada.

Para el caso del micropilote con BD, se instalaron dos cables de fibra óptica (*ODISi/Nerve* y *LIOS/Nanzee*), sensores del tipo FBG para medir microdeformaciones, dos sensores FBG (*Sylex* y *Micron Optics*) a -5.75 m, además de tres sensores FBG (*Micron Optics*) en una sección cercana a la punta del micropilote, como se observa en la Figura 10.

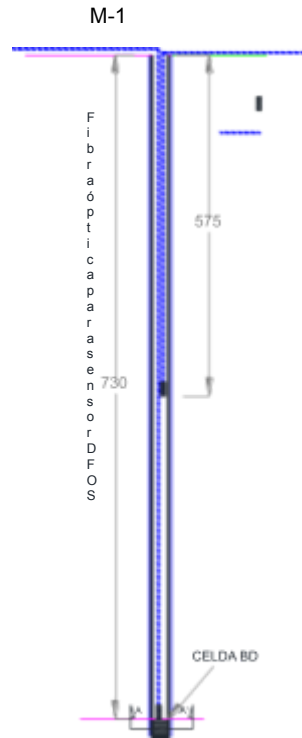
MICROPILOTE SENCILLO



MICROPILOTE EB



MICROPILOTE CELDA BD



En la Figura 11, se muestra en planta el arreglo de pruebas de carga a compresión; en los vértices del arreglo triangular se construyeron pilas de reacción y en los lados del triángulo los micropilotes por ensayar.

MP-Sencillo

3.3 Programa de instrumentación

La instrumentación se programó incluyendo dos tipos diferentes de medición:

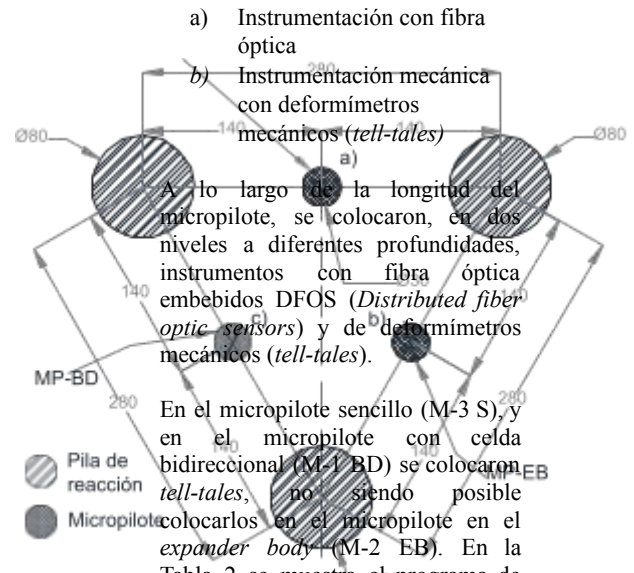


Tabla 2. Ubicación de instrumentación en micropilotes.

Micropilote	Nivel	Nomenclatura de DFOS	Ubicación					
			DFOS	<i>Tell-tales</i>				
Sencillo (M-3)					1	DFOS-1	-5.75 m	
						2	DFOS-2	-7.05 m
								-6.60 m
Celda BD (M-1)			EB (M-2)		1	DFOS-3	-5.75 m	
						2	DFOS-4	-7.80 m
					1	DFOS-5	-5.75 m	
					2	DFOS-6	-7.30 m	
							-6.60 m	

Figura 11. Arreglo de pruebas de carga a compresión, a) micropilote

sencillo, b) micropilote con *expander body* y c) micropilote con celda bidireccional.

En la Figura 12 se muestra una vista de uno de los arreglos de las pruebas de carga; se destaca la viga de reacción, así como el marco de referencia, para la instalación de instrumentos de medición de desplazamientos en la cabeza de los micropilotes. En esta figura se

distinguen los cabezales de concreto, tanto en las pilas de reacción, como en el micropilote de prueba. Asimismo, se muestran los cilindros y bomba hidráulica para la aplicación de la carga, así como las celdas de carga.



Figura 13. Colocación de fibra óptica embebidos DFOS (*Distributed fiber optic sensors*).





Figura 14. Colocación de *tell-tales* en micropilote.

3.4 Instrumentación con fibra óptica

El sistema de instrumentación con fibra óptica, consistió en dos cables: en LIOS/*Nanzee* y el ODiSi/*Nerve*, realizando un recorrido de toda la longitud de los micropilotes, un cambio de dirección y un regreso dentro del armado del micropilote; solo al micropilote con celda bidireccional (BD) se le colocaron sensores tipo FBG- *Sylex* (ver Figura 15), que miden microdeformaciones y sensores BFG-*Micron Optics* que miden temperatura; en la Tabla 4, se muestran los tipos de instrumentación con fibra óptica colocados.

Tabla 4. Instrumentación con fibra óptica en micropilotes.

Adquisición de datos		M-1 BD	M-2 EB	M-3 S
LIOS PRE.VENT	(1) sensor δ (DFOS- <i>Nanzee</i>)	(1) sensor δ (DFOS- <i>Nanzee</i>)		(1) s e n s o r δ (D F O S - N a n Z e e)
ODiSI 6104	(1) sensor δ (DFOS- <i>Nerve</i>)	(1) sensor δ (DFOS- <i>Nerve</i>)		(1) s e n s o

Figura 15. Instrumentación con sensores FBG de microdeformaciones y de temperatura.

Durante las inyecciones se registraron deformaciones; en la Figura 16, se presentan las lecturas de la aplicación de la lechada primaria y secundaria en el micropilote EB y en la Figura 17, se presentan las lecturas para el micropilote BD.

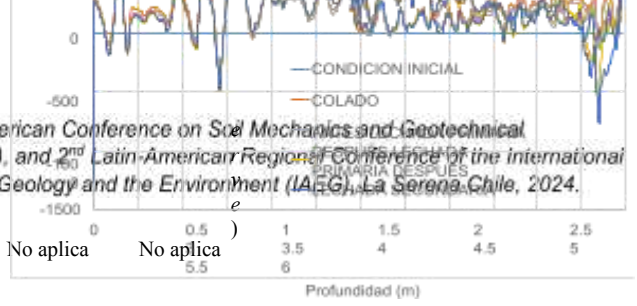


Figura 16. Microdeformaciones vs. profundidad durante el colado e inyección, micropilote EB, cable ODISI/Nerve.

3.5 Registros durante el proceso constructivo de micropilotes.

3.5.1 Medición de microdeformación

Se registraron las deformaciones unitarias (microdeformaciones) de los micropilotes antes del colado, en colado-fraguado, y durante la inyección de lechada (en los casos de los micropilotes BD y EB). Una vez construido el cuerpo del micropilote, en el micropilote EB se realizó una inyección primaria para expandir la cámara y posteriormente, una inyección secundaria en la parte inferior. Al micropilote BD se le inyectó una lechada secundaria, para expandir la celda y generar una precarga de punta y de fricción.

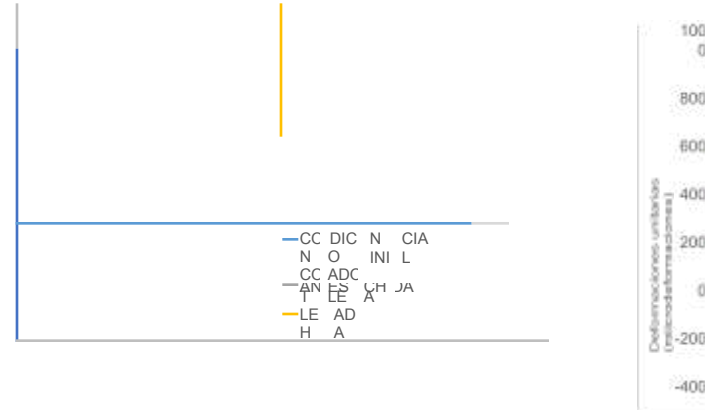


Figura 17. Microdeformaciones vs. profundidad durante el colado e inyección, micropilote BD, cable ODISI/Nerve.

3.5.2 Medición de temperatura

Adicionalmente, se registró la temperatura interna en puntos específicos del micropilote con celda bidireccional durante el proceso de colado-fraguado en las secciones -0.55 m, -2.93 m y -5.79 m con los sensores FBG (*Sylex* y *Micron Optics*). En la Figura 18, se muestran las curvas de temperatura registradas durante las primeras horas del fraguado del concreto.

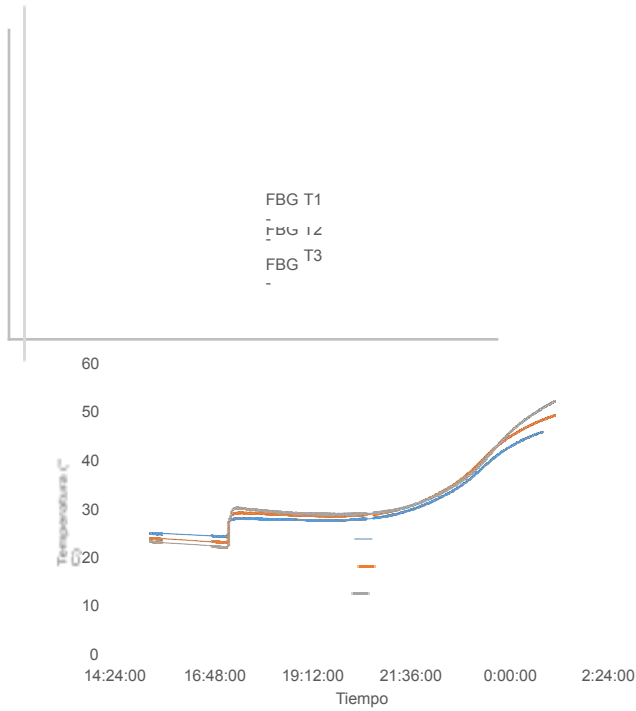


Figura 18. Evolución de la temperatura durante el fraguado del concreto en micropilote BD.

3.6 Registros de pruebas de carga

En la Figura 19, se presentan las curvas carga-desplazamiento para las tres pruebas de carga a compresión en los micropilotes M-1, M-2 y M-3.

			Micropilote CELD	BIDIR	ECCION	ALM-1
			Micropilote EXP	NDER	ODY	-2
			Micropilote SEN	IL	LO	M-3

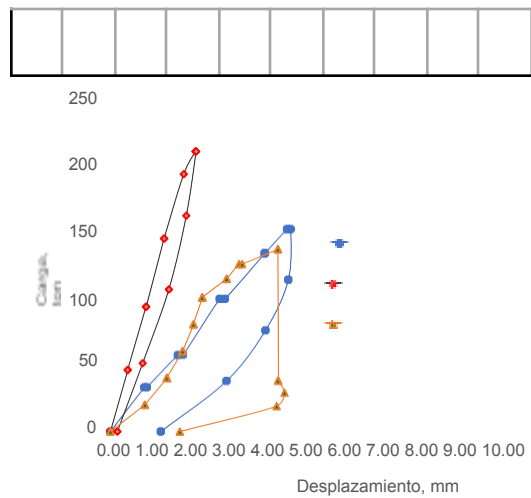
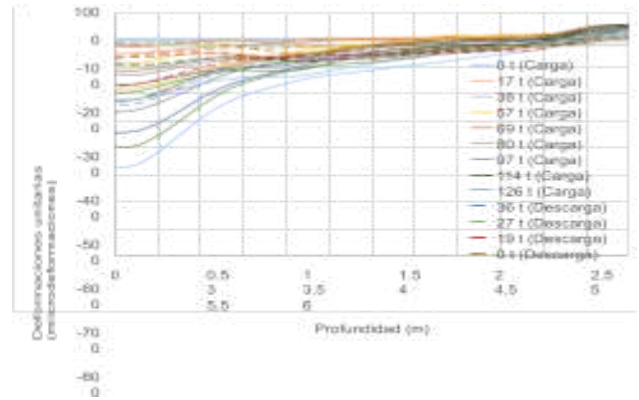


Figura 20. Microdeformaciones vs. profundidad, micropilote S cable DFOS-NanZee.

Figura 21. Microdeformaciones vs. profundidad, micropilote S cable ODISI-Nerve.

Se realizó el post-procesamiento de la información de los datos obtenidos en las figuras previas, donde se presentan las microdeformaciones medidas en los cables, las cuales se derivan en la obtención de las curvas de transferencia obtenidas por el método o de rigidez incremental, (Komurka & Moghaddam 2020).

En la Figura 22, se presenta la gráfica de curvas de transferencia de carga vs. profundidad para S, obtenidas utilizando el método del módulo de rigidez incremental, con los resultados del procesamiento de los datos obtenidos en el cable de fibra óptica DFOS-ODISI-Nerve.

Figura 19. Curvas carga vs. desplazamiento, en prueba de compresión.

En las Figuras 20 y 21 se presentan, a manera de ejemplo, los registros obtenidos con los cables de fibra óptica DFOS-NanZee, y DFOS-Nerve, respectivamente, para el micropilote S.

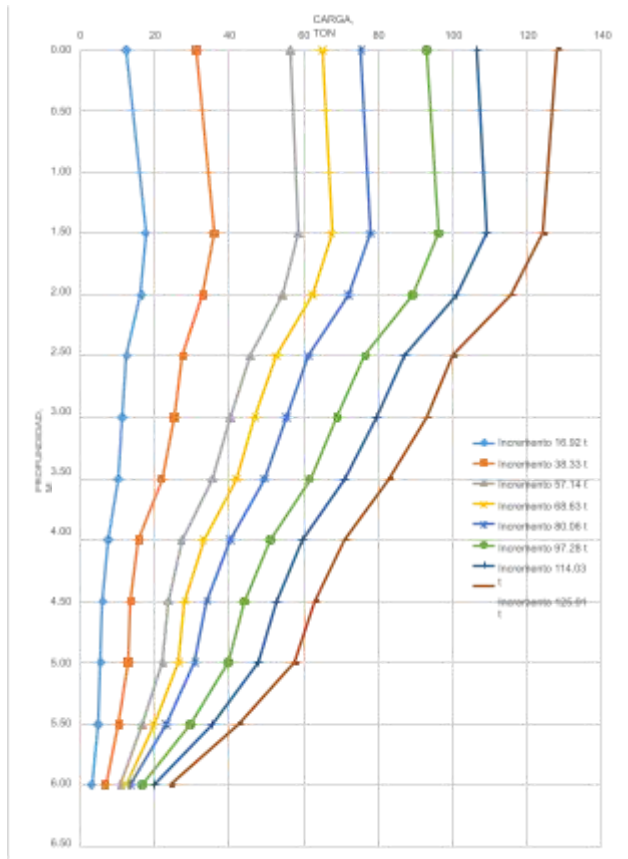


Figura 22. Curvas de transferencia de carga vs. profundidad, micropilote S, cable DFOS-ODISI/Nerve.

De manera análoga a anterior, se obtuvieron las curvas de transferencia del micropilote BD Figura 23 y en la Figura 24 se presentan las curvas de transferencia para el micropilote EB.

3.6.1 Sensores FBG-Sylex

En la Figura 25 se muestran las mediciones obtenidas con el sensor FBG (Sm130-Sylex), en el que se observan las deformaciones detectadas con los sensores localizados en dos diferentes secciones del micropilote M-1, con celda bidireccional. Los datos se obtuvieron graficando la deformación unitaria detectada en los dos niveles del sensor FBG vs el tiempo de aplicación de las cargas de acuerdo al ciclo de carga realizado durante la prueba de carga a compresión.

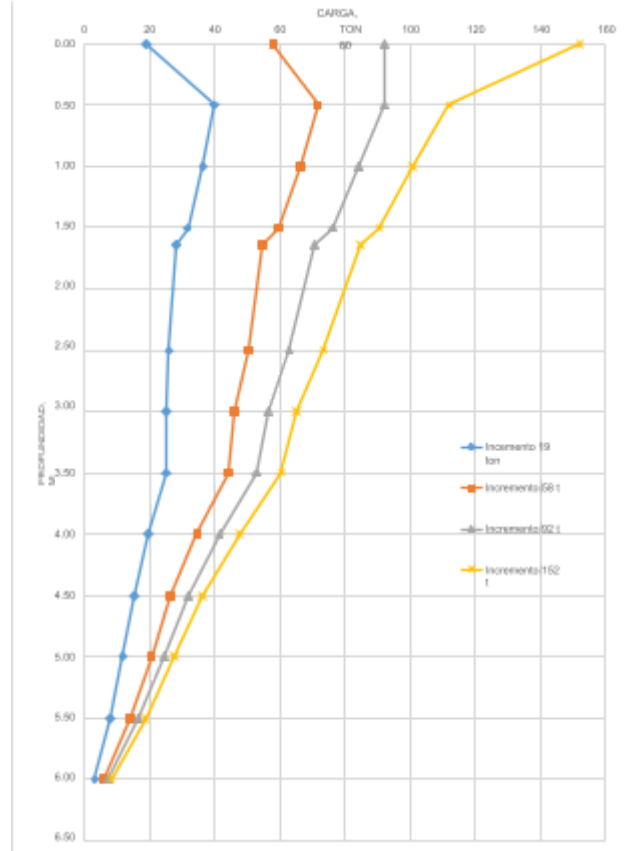


Figura 23. Curvas de transferencia de carga vs. profundidad, micropilote BD, cable DFOS-ODISI/Nerve.

4 CONCLUSIONES

Se realizó en la Ciudad de México el estudio de tres micropilotes a los que se realizaron pruebas de carga, cada uno con diferentes características de diseño y procedimiento constructivo: sencillo (S), con celda bidireccional (BD) y con *expander body* (EB). Los tres fueron instrumentados con cables de fibra óptica (DFOS-LIOS/Nanzee y DFOS-ODISI/Nerve) con la finalidad de medir microdeformaciones generadas durante el procedimiento constructivo y durante el proceso de carga a compresión. Adicionalmente a los cableados de fibra óptica, al BD se le agregaron dos sensores FBG Sylex (medición de microdeformaciones en dos secciones) y Micron Optics (Medición de temperatura en tres secciones, además de dos deformímetros mecánicos en dos secciones (*tell-tales*). Al micropilote S, se le agregaron dos *tell-tales*, en dos secciones cercanas a la punta y cercano a la parte media superior del micropilote.

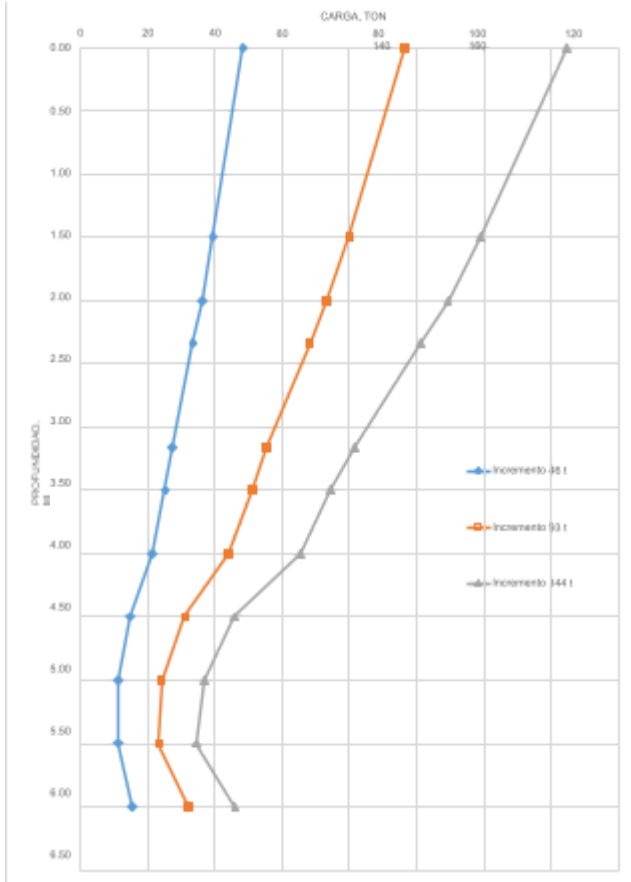


Figura 24. Curvas de transferencia de carga vs. profundidad, micropilote EB, cable DFOS-ODiSi/Nerve.

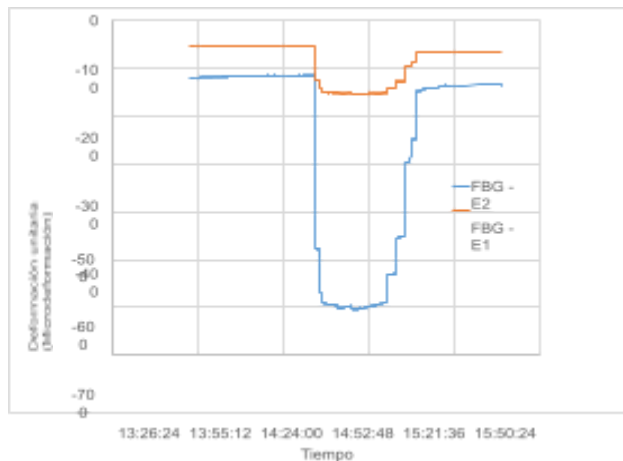


Figura 25. Microdeformaciones vs. tiempo, durante prueba a compresión, sensores FBG Sylex.

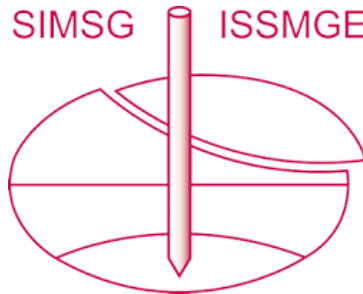
De los resultados, se observa el desarrollo de mediciones de microdeformaciones en la totalidad de la sección de los

micropilotes con cableado, en cada una de las etapas de carga a las que fueron sometidos durante las pruebas a compresión, comprobando su eficacia para la obtención de información detallada y precisa sobre su comportamiento interno, como son las microdeformaciones a lo largo de toda la longitud del elemento y también, de manera puntual, microdeformaciones en secciones determinadas y temperatura en las mismas secciones durante el fraguado del concreto. Se aprecia que la utilidad de la instrumentación con fibra óptica es bastante buena con respecto a las instrumentaciones convencionales, siendo la principal ventaja la visualización del comportamiento de la transferencia de carga con la profundidad, prácticamente en la totalidad de la longitud del cable embebido en el micropilote. De forma general, la instrumentación con fibra óptica continua permite obtener datos en longitudes mucho menores que con strain gauges, medición de forma continua, alta durabilidad del sensor (fibra) lo que permite realizar mediciones en tiempos prolongados y, considerando todo lo anterior, resulta económicamente competitivo.

5 REFERENCIAS

- ASTM D-1143 2007. *Standard Test Methods for Deep Foundations Under Static Axial Compressive Load*. United States of America.
- Epsilon 2023. DFOS sensors. Brochure. Nerve-sensors.com.
- IMT (Instituto Mexicano del Transporte) 2023. *Monitoreo de micropilotes – more direct conversion of strain to internal force in an instrumented con tecnología de fibra óptica durante el proceso de colado y prueba de carga, Informe de Investigación*.
- Mohamad, H. (2023). *Distributed fibre optic inclinometer with cloud-based LIOS.PREVENT 2023. Distributed Structure Monitoring monitoring system*. Malasia. Departamento de Ingeniería Civil y del Medio Ambiente, Universidad Tecnológica PETRONAS. Brochure. Luna.
- ODiSi (2023). *ODiSi 6000 Series. Optical Distributed Sensor*
- Komurka, V. and Moghaddam, R. (2020) "The incremental rigidity method Interrogators. Brochure.
- Paniagua, W. 2017. "Micropilotes". *Ingeniería de Cimentaciones Profundas*. Ciudad de México. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica 7, 519-562.
- Paniagua, W. 2023. *Determinación de la capacidad de carga por fricción y punta de pilas de cimentación con celda de carga bidireccional en suelos granulares*. Ciudad de México. Tesis de Doctorado UNAM.
- Rodríguez, Y. 2009. *Fibra óptica*. El Cid Editor.
- SM-130 2023. *Micro Optics SM-130. Optical Sensing Interrogator sm130*. Micron Optics. Brochure.

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.