

El Ensayo de Integridad por Perfil Térmico, un nuevo método para evaluación de integridad de cimentaciones profundas

Gina Beim^{a,1}, Jorge Beim^b, Sandre Cyrre Lima^c
^{a, b}*Pile Dynamics, Inc.*
^c*Geotechn*

Resumen: La ejecución de fundaciones coladas in situ, tales como pilotes perforados, barrenados, etc., naturalmente requiere extrema cautela por parte de todos los profesionales que intervienen en la obra. Las características del proceso de hormigonado de estos elementos de fundación hacen difícil comprobar que el pilote se ha instalado con las dimensiones del proyecto, y que el hormigón está perfectamente intacto. Un nuevo ensayo de integridad fue desarrollado con el fin de proporcionar más informaciones sobre las condiciones de estos elementos de cimentación. El ensayo se basa en mediciones de la temperatura de cura del hormigón, realizada a lo largo del fuste de 12 a 48 horas tras el hormigonado, usando sensores térmicos. Este documento proporciona una visión general del método de análisis de integridad a través del perfil térmico (TIP – Thermal Integrity Profiling), detalla el procedimiento de ensayo y discute el análisis de las mediciones de temperatura. Se presenta también un caso de obra, y se discute las principales ventajas de este tipo de ensayo. A conclusión se presenta una discusión sobre las situaciones en las que el Ensayo de Integridad por Perfil Térmico dará una mejor información sobre la integridad del pilote.

Palabras-clave: ensayo de integridad; temperatura de cura del hormigón; perfil térmico; pilotes perforados; pilotes barrenados; fundaciones coladas in situ

1. Introducción

Es indudable que la calidad de la mano de obra, el control de calidad e inspecciones reducen la incidencia de anomalías en la ejecución de los pilotes moldeados in situ. Sin embargo, independientemente de lo cuán diligente es el equipo de campo, ellos no tienen la posibilidad de observar todo lo que está pasando durante la excavación o durante el vaciado del hormigón en una perforación llena de agua turbia. Es principalmente para estas perforaciones sumergidas en agua que es imperativo emplear algún proceso para evaluar la integridad de la fundación como construida, y con esto surge la necesidad de implementar métodos de Ensayos no Destructivos (END). En este trabajo, las ventajas y limitaciones de los métodos de prueba tradicionales se repasan brevemente. Una tecnología más reciente, el análisis de integridad a través del perfil térmico (TIP, del inglés Thermal Integrity Profiling), es discutida y comparada con los ensayos más establecidos. TIP se basa en el hecho de que la energía térmica liberada durante la hidratación del cemento depende del contenido de cemento y del volumen

¹ Autor Correspondiente

total de hormigón. Las mediciones de temperatura obtenidas dentro de una fundación durante su cura se correlacionan con su radio efectivo y con la calidad del hormigón. En este trabajo se resume la base teórica del ensayo TIP, y se describen formas alternativas de obtener mediciones de temperatura en el interior de la fundación. Se discute también la interpretación de las mediciones, incluyendo la relación de los datos medidos en la jaula de refuerzo durante la cura con la calidad del hormigón, los diámetros de eje, el recubrimiento local de hormigón y el alineamiento de la jaula de refuerzo. Se presenta también un caso de obra, y se discute las principales ventajas de este tipo de ensayo.

2. Métodos tradicionales de verificación de integridad de fundaciones in situ

Los métodos tradicionales de ensayos de integridad no destructivos para pilotes colados in situ incluyen el ensayo de integridad de baja deformación (pulso-eco), el cross-hole o digrafía sónica (CSL), y el “Gamma-gamma logging” (GGL). A continuación se presenta una breve descripción de cada uno de ellos; Rausche (2004) presenta una visión más extensa de los métodos. La extracción de testigos no es típicamente considerada un END.

Si no se toman medidas antes de colocar el hormigón para llevar a cabo pruebas de integridad, las opciones se limitan a la perforación para extracción de testigos, o prueba de integridad de baja deformación (PIT). Esta última consiste en impactar la parte superior de la fundación bajo prueba con un martillo de mano, para generar una onda compresiva que se refleja en la punta de la fundación y vuelve a la cabeza, donde se mide la señal de retorno. Cambios en la sección transversal también causan reflexiones, aunque antes de lo esperado. Por tanto, es posible, en circunstancias ideales, observar defectos importantes dentro de la fundación. La prueba es rápida y no requiere de técnicas especiales de construcción, pero a medida que la relación entre longitud y diámetro aumenta, puede que no dé resultados concluyentes.

El CSL requiere que se planifique tubos de acceso en el fuste (normalmente unidos a la armadura de refuerzo), antes de moldear. Después del curado, un transmisor ultrasónico se inserta en uno de los tubos y un receptor en otro. El transmisor y el receptor son bajados dentro de los tubos, y luego son levantados desde el final hasta la parte superior, mientras la señal recibida va siendo registrada y analizada cuanto a su tiempo de llegada y energía. El tiempo de tránsito desde el transmisor hasta el receptor, así como la energía de la señal, se correlacionan con la calidad del hormigón y con la presencia de anomalías dentro del perímetro formado por los tubos de acceso. Barriendo todas las combinaciones de tubos de acceso da una idea bastante precisa de la parte central del fuste, pero no del área fuera de la armadura de refuerzo o del recubrimiento de hormigón.

El GGL también es realizado a través de tubos de acceso. El ensayo consiste en bajar una sonda conteniendo un material radioactivo en un tubo mientras esta emite partículas que se transmiten a través del hormigón a un contador de fotones. El contador determina la densidad del material a través del cual las partículas han pasado. Este ensayo barre un radio de cerca de 76 mm alrededor de cada tubo de acceso, lo que es típicamente un porcentaje muy pequeño del área de sección transversal. Cuando usado en conjunto con el CSL, el GGL aumenta el área probada más allá del perímetro formado por los tubos de acceso.

Cada uno de estos métodos puede tener éxito en la evaluación de la integridad del fuste, pero todos tienen limitaciones. Realizar más de un tipo de prueba puede superar estas limitaciones.

3. El análisis de integridad a través del Perfil Térmico

Conocido por su sigla en inglés TIP (de Thermal Integrity Profiling), es un método relativamente nuevo (Mullins y Krank 2007; Piscalko y Cotton, 2011), que supera muchas de las limitaciones de los otros métodos de END. Él evalúa el hormigón de todas las porciones del área de sección a lo largo de toda la longitud. El TIP también evalúa la verticalidad de la armadura de refuerzo y el recubrimiento de hormigón, y se puede realizar antes que las otras pruebas de integridad de fundación.

El TIP consiste en relacionar la temperatura generada por la cura del cemento con la calidad de los pilotes colados in situ. En general, la escasez de hormigón competente (estrechamientos o inclusiones) se registra como regiones relativamente frías; la presencia de hormigón extra (ensanchamiento por sobre-vierta en estratos de suelo blando) es registrada por regiones relativamente cálidas. Anomalías tanto dentro como fuera de la armadura de refuerzo no sólo interrumpen el padrón de temperatura cerca de la anomalía, sino también en lugares más distantes, aunque a efectos progresivamente menores.

La temperatura interior del fuste depende del diámetro de la fundación, del diseño de la mezcla de hormigón y del tiempo de medición. La distribución teórica de temperatura dentro de un fuste perfecto tiene forma de campana con respecto a la posición radial. Las temperaturas medidas dentro del fuste (normalmente en la armadura de refuerzo) sesgan lejos de la forma teórica cuando la armadura es excéntrica o el recubrimiento de hormigón es insuficiente (Figura 1, Mullins, 2010). Una armadura ligeramente más cerca de uno de los lados de la excavación exhibe temperaturas más frías que el promedio en puntos de medición más próximos del suelo, y temperaturas más altas en puntos de medición más cerca del centro del fuste.

En la región alrededor de la armadura, donde fueron tomadas las mediciones, las temperaturas varían linealmente con el diámetro del fuste. Por tanto, un gráfico de la temperatura media de todos los puntos de medición frente a profundidad puede representar la forma real del fuste. La evaluación de la forma y la calidad global del fuste se mejora aún más mediante la inclusión del registro de la construcción y hormigonado en el análisis.

La norma ASTM D7949-14, “Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations”, proporciona procedimientos para medir el perfil de temperatura dentro de un elemento de cimentación profunda moldeado in situ. Las mediciones de temperatura se obtienen ya sea conectando alambres equipados con sensores térmicos digitales a la armadura de refuerzo, o mediante la inserción de sondas en tubos de acceso instalados previamente, similar al CSL o GGL.

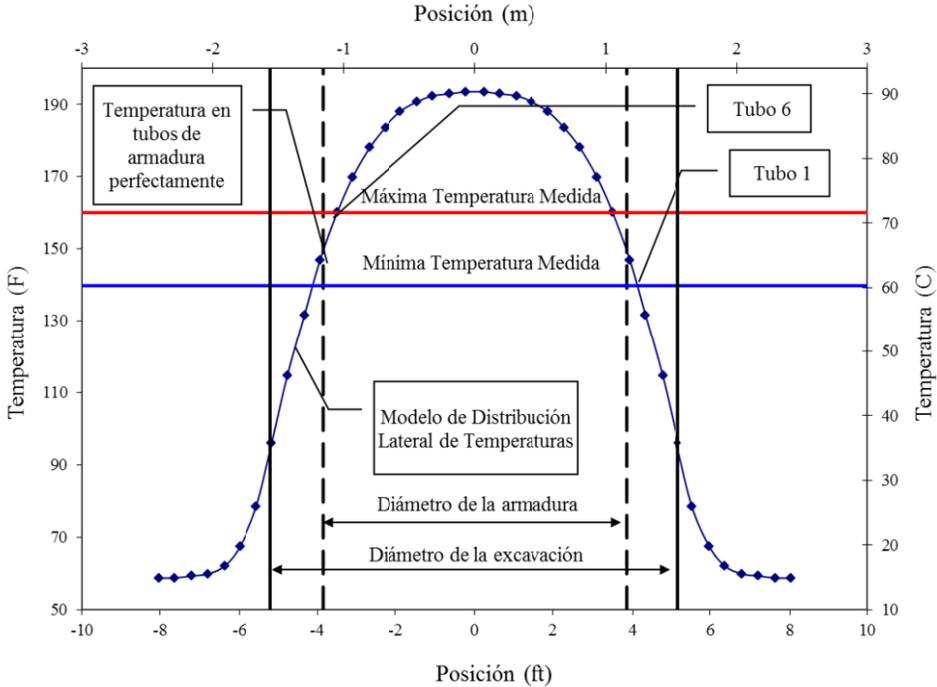


Figura 1. Distribución de temperaturas medidas durante la cura en el interior del fuste

Cuando los datos se obtienen por alambres (en amarillo, Figura 2), no se requieren tubos de acceso. Esto es a menudo ventajoso para las fundaciones de líneas de transmisión, donde la geometría es tal que la instalación de tubos de acceso es un reto. Cada uno de los varios alambres dentro de un pilote tiene sensores térmicos a cada 0,30 m, y está equipado con una unidad de adquisición de datos alimentado por batería que registra temperaturas a intervalos de 15 minutos. Se mide todo el proceso de curado del hormigón, y los datos se recogen en el sitio en cualquier momento después de la fundición.

Los datos de temperatura recogidos e inmediatamente observados en campo pueden resaltar de inmediato las irregularidades flagrantes. Debido a que el perfil medio de temperatura muestra la forma general del fuste, la observación de cómo los perfiles de temperatura medidos en cada punto varían de la media de todos los perfiles revela desalineaciones de la armadura, estrechamientos, lugares de ensanchamientos potenciales y otras áreas de preocupación (Piscsalko et al, 2013).



Figura 2. Alambres (amarillos) con sensores térmicos (indicados por una flecha) pegados a la armadura de refuerzo.

Si la información sobre el volumen de hormigón vertido está disponible a partir de los registros de campo, el radio efectivo real en cualquier lugar a lo largo del fuste puede ser estimado igualando el perfil medio de temperatura (por lo general cerca del instante de temperatura máxima) al radio promedio (calculado a partir del volumen total vertido y la longitud total del pilote). El término “radio efectivo” fue cuñado para hacer frente a la situación en la que hay variación de la calidad del hormigón, en lugar de la forma del fuste. El radio efectivo se define como el radio de hormigón intacto y no comprometido que produciría la temperatura medida.

Los datos de temperatura pueden ser adicionalmente evaluados en cuanto a defectos locales. En este análisis, se verifica la evolución temporal de la temperatura (durante el periodo bastante antes de que se alcance la temperatura máxima) en busca de disminuciones locales que señalan una cantidad reducida de cemento productor de calor, ya sea causado por estrechamiento o por hormigón contaminado. A través de un análisis similar, los aumentos de temperatura señalan un ensanchamiento.

La temperatura en la parte superior del perfil medido típicamente exhibe un efecto de "roll-off" (enfriamiento) debido al calor que se irradia desde la parte superior del fuste. Del mismo modo, un “roll-off” de temperatura en la parte inferior es causado por intercambio de calor con el suelo circundante. Es relativamente fácil de distinguir estos efectos normales de intercambio de calor de los cambios de temperatura causados por anomalías en el fuste, cuando se disponen las temperaturas ambiente y del suelo en el lugar (las cuales por general son conocidas).

4. Estudio de caso

En este trabajo se presentan los resultados del ensayo TIP en cinco pilotes raíz en la obra de construcción de generadores eólicos en el “Complejo Eólico do Alto Sertão III”, en la ciudad de Caetitê, en el sudeste del estado de Bahia, Brasil, perteneciente a la empresa Renova Energia S/A. El Complejo Eólico Alto Sertão III es un conjunto de 46 parques con capacidad instalada de 736,8 MW. Este complejo se junta al Alto Sertão I, inaugurado en 2012, con 293,6 MW de capacidad instalada, y al Alto Sertão II, inaugurado en 2014, con capacidad instalada de 386,1 MW.

4.1. Descripción de los pilotes y de la instrumentación

Los pilotes raíz son moldeados in situ a través de perforación rotatoria o por rotopercusión, totalmente revestido en la sección en suelo con tubo metálico que garantiza la estabilidad de la perforación. La ejecución de este tipo de pilote comprende la siguiente secuencia:

1. Perforación con ayuda de agua, realizada por rotación de tubos roscados a la medida en que avanza la perforación.
2. Perforación de la roca (si es el caso) a través del interior del tubo de revestimiento usando martillo de fondo accionado por aire comprimido.
3. Instalación de la armadura hasta el final de la parte empotrada en roca.
4. Inyección de mortero a través de tubo insertado hasta el final de la perforación, hasta que el mortero desborde por la boca del tubo de revestimiento, para garantizar que todo el lodo o agua de perforación sea sustituida por el mortero. NOTA: en este caso particular en algunos pilotes se usó también el proceso de verter el hormigón por gravedad, para verificación del efecto de los diferentes métodos en la integridad.
5. Uso de una tapa metálica roscada en la parte superior del tubo, ligada a un compresor para la aplicación de golpes de aire comprimido durante la extracción del revestimiento. A la medida en que los tubos van siendo sacados el nivel del mortero baja, obligando a que sea completado el nivel antes de la aplicación de otro golpe de aire comprimido.

Las principales características de los pilotes probados están en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de los pilotes

Pilote	Diámetro (mm)		Longitud (m)	Volumen aprox. de mortero utilizado (m ³)	Método de vaciado
	Nominal	Armadura			
1	310	230	10,4	0,87	Tubo
2	310	230	10,4	0,87	Tubo
3	310	230	10,4	0,87	Gravedad
4	310	230	10,4	0,87	Gravedad
5	310	230	10,4	0,87	Gravedad

Fue usado un solo alambre térmico pegado a una barra central (Figura 3). Esta configuración, aunque eficiente, no es la más comúnmente utilizada, y difiere de la configuración descrita en la sección 2.0 de este trabajo. En general, para pilotes reforzados con armadura, se utiliza un alambre térmico para cada 30 cm de diámetro, aproximadamente.

4.2. Resultados obtenidos

Cuando varias mediciones de temperatura versus profundidad están disponibles, es posible comparar las temperaturas en varios puntos en una misma profundidad, y comparar los varios perfiles con el perfil promedio. Esto permite sacar conclusiones acerca del alineamiento de la armadura y del recubrimiento del hormigón. En este caso de obra, sin embargo, no fue posible hacer este tipo de análisis, debido a haber sido usado un solo alambre. La figura 4 muestra un ejemplo de perfil geométrico del pilote.

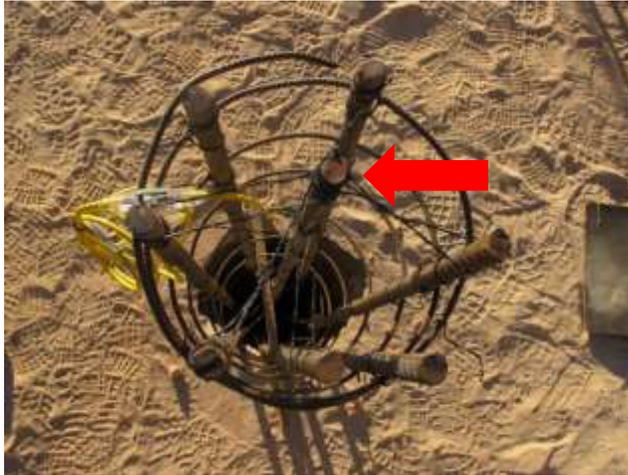


Figura 3. Vista de la barra central con el alambre térmico fijado en un pilote raíz

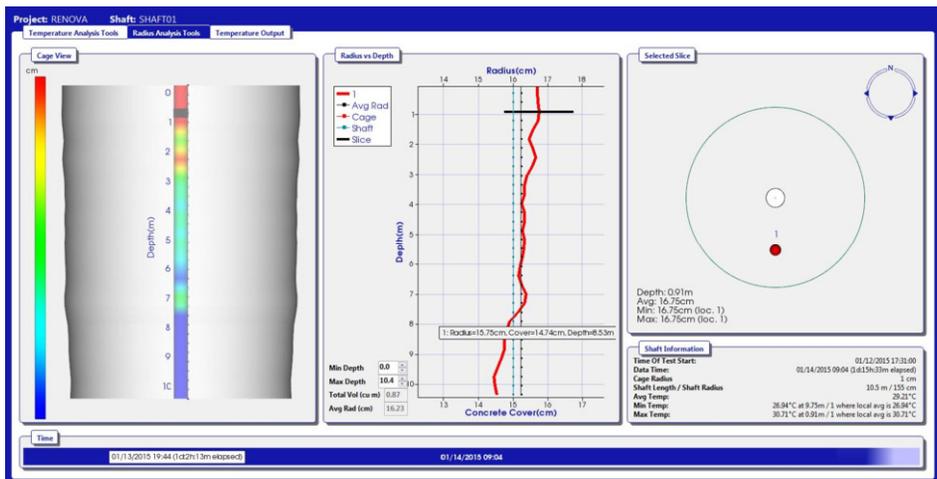


Figura 4. De la izquierda hacia la derecha: perfil 3D del pilote; variación del recubrimiento de la armadura a lo largo de la profundidad; sección transversal indicada por la línea negra.

En general todas las señales obtenidas se ven muy bien; no hubo problemas señalados. Algunos detalles levantados:

1. La armadura aparenta estar elevada desde la parte inferior (no hay “roll-off” en la parte inferior de los gráficos de temperatura).
2. La barra central donde fue instalado el alambre térmico aparenta estar un poco fuera de centro en algunos casos.
3. El método de vaciado (tubo o gravedad) no tuvo influencia en la integridad de los pilotes.
4. Los datos fueron colectados en diferentes períodos de tiempo, buscándose determinar cuál sería el período de tiempo mínimo necesario para obtención de datos de calidad. Se observó un límite mínimo de 15 horas con 30 minutos y

máximo de 39 horas para la ventana de tiempo necesario para obtención de las temperaturas de pico. Compárese este tiempo con una espera típica de 170 horas necesaria para el ensayo de integridad de baja deformación (PIT).

5. Conclusiones

El control de calidad es esencial durante la construcción de cimentaciones profundas. Mismo cuando el control de calidad es ejecutado juiciosamente, la construcción aún puede tener defectos. Además, para las fundaciones ejecutadas bajo el agua, es imposible de observar lo que ocurre durante la instalación. La verificación de la integridad de la fundación por métodos no destructivos es indispensable en estas situaciones. Aunque los ensayos pulso eco, cross-hole y gamma gamma tienen aspectos positivos, ninguno de estos métodos es completamente integral en su investigación. Todos tienen la posibilidad de dejar sin analizar "zonas ciegas" del pilote. Los ensayos TIP pueden explorar la totalidad de un pilote perforado, tanto vertical como horizontalmente. Más importante, evalúa el recubrimiento de la armadura, lo que ninguno de los otros métodos puede medir. TIP también es atractivo en que se lleva a cabo poco después de ejecutarse el pilote, antes que los otros ensayos, permitiendo que la aprobación del pilote (o medidas correctivas) acontezcan antes.

6. Referencias

1. American Society of Testing and Materials (ASTM). ASTM D7949-14, *Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations*, West Conshohocken, PA, 2014.
2. Mullins, A. G., Thermal Integrity Profiling of Drilled Shafts, *DFI Journal*, Deep Foundations Institute, Vol. 4, No.2, (2010), 54-64
3. Mullins, A. G., Kranc, S., *Thermal Integrity Testing of Drilled Shafts, Final Report to Florida Department of Transportation*, FDOT Project BD544-20, University of South Florida, Tampa, FL, 2007.
4. Piscsalko, G., and Cotton, D., Non-Destructive Testing Methods for Drilled Shaft and ACIP Piles, *Proceedings from Deep Foundations Institute 36th Annual Conference on Deep Foundations*, Boston, MA, (2011), 252-532.
5. Piscsalko, G., Likins, G. E., White, B., Non-Destructive Testing of Drilled Shafts – Current Practice and New Method, *Proceedings from the International Bridge Conference* Pittsburg, PA (2013), USB-Drive.
6. Rausche, F., Non-Destructive Evaluation of Deep Foundations. *Proceedings of the Fifth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, New York, NY, (2004), CD-ROM.