

Pruebas de integridad a gran escala en pilas de cimentación del Muelle Multipropósitos C, en el Puerto de Montevideo, Uruguay

J. Guillermo CLAVELLINA MILLER¹, Rogelio MONROY SALGADO¹, Álvaro GUTIÉRREZ², Camilo ÁLVAREZ³, Florent ANDRE⁴, Juan PAULÍN AGUIRRE¹
¹CIMESA, Soletanche-Bachy, México

²Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Uruguay

³Pile Dynamics, E.U.A.

⁴Soletanche-Bachy, Uruguay

Resumen. El Muelle C, ubicado en el Puerto de Montevideo, Uruguay, actualmente en proceso de construcción, está estructurado por una losa de 373 m de largo y 36 m de ancho, apoyada en 256 pilas. Durante la construcción de una de las pilas, de acuerdo con los registros de los ensayos de compresión simple sobre algunas de las muestras del concreto empleado, se detectaron problemas en el fraguado del mismo, lo que generó incertidumbre acerca de la calidad del concreto colocado en cierta altura de la pila. Con el fin de confirmar la integridad estructural de dicha pila, se realizó una prueba de integridad a gran escala, basada en el procedimiento empleado para la realización de pruebas de carga dinámicas. El presente documento describe el procedimiento general de la prueba, los resultados y las conclusiones obtenidas.

Abstract. Muelle C is located in the port of Montevideo, Uruguay, it is actually in the construction process, it is structured by a 373 m long and 36 m width slab, supported on 256 piers. During the construction of one of the piers, according to the unconfined compression tests registries, some setting problems were detected which generated uncertainty about the concrete quality at some height in the pier. In order to confirm the structural integrity of this pier, a full-scale integrity test was performed, based on the procedure used for dynamic tests. This document describes the general test procedure, the results and conclusions obtained.

Keywords. Pier, Structural integrity, Dynamic test

1. Introducción

1.1. Descripción del Proyecto

El “Muelle multipropósitos C”, que se ubica en el puerto de Montevideo Uruguay, está conformado por un tablero de concreto armado de 373 m de longitud y 36 m de ancho, dividido en tres módulos de longitud similar.

La subestructura está compuesta por 256 pilas de concreto reforzado de 1.07 m de diámetro, forradas con un tubo de acero de 9.53 mm de espesor y desplantadas a una profundidad aproximada de 33 m (Figura 1). La superestructura está constituida por vigas prefabricadas de concreto reforzado, que se cuelan junto con la losa que forma la superficie de rodamiento del muelle (Figura 2).



Figura 1. Pilas del muelle C.



Figura 2. Superestructura del muelle C.

Las pilas del muelle se distribuyen a lo largo de cuatro ejes longitudinales denominados A, B, C y D; y 57 ejes transversales numerados del 1 al 57 (Figura 3). Es en la pila ubicada en la intersección de los ejes 28 y A donde se detectó el problema que llevó a la realización de la prueba de integridad a gran escala que se describe más adelante.

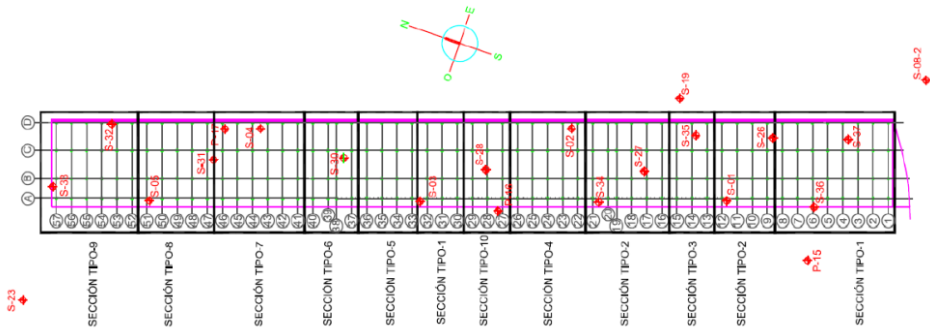


Figura 3. Planta del Muelle C.

1.2. Procedimiento constructivo

El hincado de los tubos de acero que envuelven a las pilas se realizó desde una plataforma deslizante, sobre la cual hay una grúa equipada con un martillo hidráulico. El hincado se hace hasta que los tubos alcanzan la profundidad de proyecto.

El material que queda en el interior de los tubos se excava con un equipo de perforación de pilas utilizando agua como fluido de perforación (Figura 4), hasta llegar al nivel de desplante. Una vez que se alcanza el nivel de desplante se baja la armadura y vacía el concreto por medio de tubería “Tremie” (Figura 5).

Como parte del control de calidad, durante la construcción de la pila se generan las curvas de colado y se obtienen probetas cilíndricas para verificar la evolución y resistencia a la compresión simple a los 7, 14 y 28 días. El momento en que se realiza el muestreo queda indicado en los registros de construcción de cada una de las pilas para tener trazabilidad.



Figura 4. Perforación de pila.



Figura 5. Vaciado de hormigón.

1.3. Descripción del problema

Para la pila 28A se encontró que algunas de las probetas de concreto no habían fraguado a los 28 días. De acuerdo con los registros de construcción éstas correspondían al concreto colocado entre los niveles -3.80 y -9.20 m.

Sin embargo, cuando el concreto alcanzó la edad de 60 días, este ya había fraguado y tomado resistencia. Se realizaron ensayos de compresión simple y se encontró que éstas habían alcanzado una resistencia de 22.5 MPa, valor inferior a la resistencia especificada (30 MPa).

En la investigación que siguió se averiguó que el retardo en el fraguado fue debido a un exceso en la dosificación del aditivo (retardante) de uso común en la construcción de cimentaciones profundas. Con el paso del tiempo, sin embargo, la tendencia del concreto debía ser alcanzar su resistencia nominal. Debido a la incertidumbre generada se decidió realizar un ensayo para determinar la integridad de la pila. Se adoptó una prueba de integridad a gran escala (prueba dinámica).

2. CONDICIONES GEOTÉCNICAS

Se realizaron una serie de sondeos geotécnicos (Geoproyectos, 2012) en la zona del muelle donde las pilas quedarían totalmente en agua. El perfil definido muestra una estratigrafía sumamente variable, en la cual, sin embargo se distinguen tres diferentes estratos de suelo y uno más de roca fracturada que sobreyace a la roca sana (Figura 6).

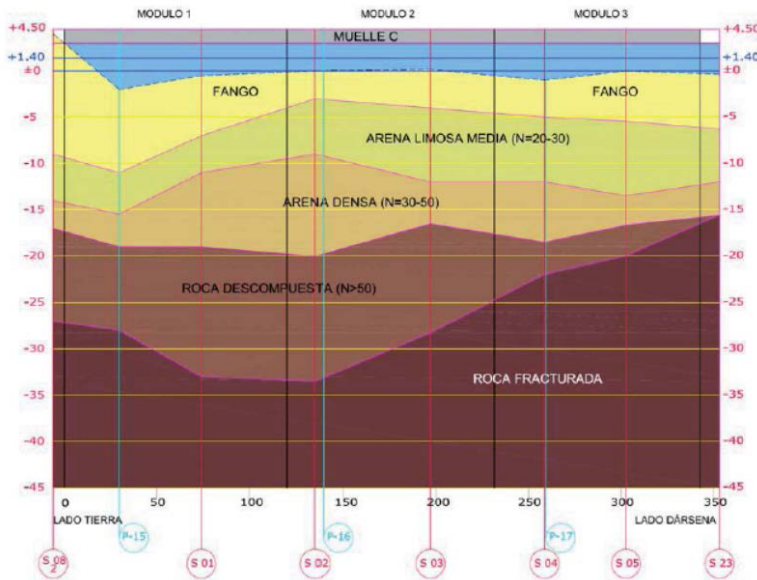


Figura 6. Estratigrafía zona del muelle C (Berenguer, 2012).

Es un hecho que conforme se profundiza a partir del fondo la calidad de los materiales tiende a mejorar. En primer lugar se tiene un material fangoso producto del azolve de materiales muy finos. A continuación se tienen suelos areno-limosos y arenas de compacidad media, producto del acarreo de las corrientes y posterior depósito. Debajo de los anteriores se encuentran los suelos saprolíticos producto de la descomposición de la roca madre. Finalmente se tiene la roca fracturada –anfíbolita- que es donde se desplantan las pilas. La estratigrafía general se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Estratigrafía general

De (m)	A (m)	Material
0.00	-5.50	Suelos cohesivos blandos (fango). Arcillas y limos arcillosos de alta plasticidad
-5.50	-16.00	Suelos areno-limosos y arenas (SM)
-16.00	-34.00	Suelo residuales y suelos cementados (roca blanda)
-34.00	-45.00	Roca: Anfíbolita

3. DESCRIPCIÓN DE LA PILA 28A

La pila 28A se encuentra en la fila extrema del muelle en el “lado agua” (Figura 7). Tiene un diámetro de 1.07 m y una longitud de 36 m —de la cual 25.5 m corresponden a la camisa de acero—. Se encuentra desplantada en la roca fracturada en el nivel -33.20 m.

Para las dimensiones mencionadas, el volumen teórico de concreto es de 32.3 m³ y en los registros de construcción se muestra un consumo de 34 m³. Lo anterior no significa que el sobre-volumen haya sido de 1.7 m³, ya que una parte del concreto se desecha con el objetivo de garantizar que haya concreto sano en la cabeza.

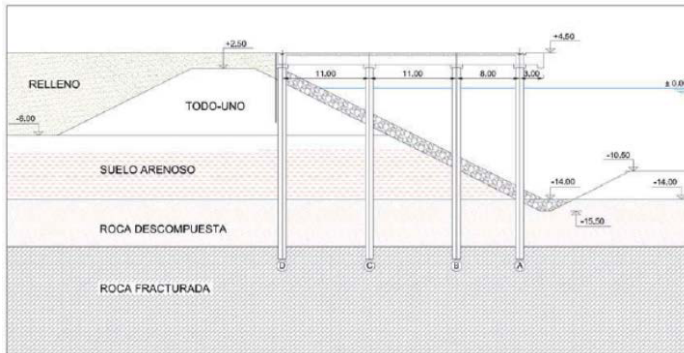


Figura 7. Sección tipo del muelle

4. MARCO TEÓRICO DE LA PRUEBA

La prueba de integridad a gran escala que se realizó en la pila 28A, es una prueba dinámica de alta deformación que consiste en aplicar un impacto axial en la cabeza del elemento para producir una deformación relativamente grande y medir la respuesta de fuerza y velocidad.

El impacto se produce dejando caer libremente una masa de peso conocido, lo cual genera una onda de tensión que recorre todo elemento y es reflejada cuando llega al fondo. Si durante su recorrido dicha onda se encuentra con un cambio importante en la impedancia del elemento (por ejemplo una reducción de la sección o cambio apreciable en las propiedades del material) se observa una variación en los registros de velocidad y fuerza.

La impedancia (Z) no solo es una medida de la resistencia al movimiento del elemento de cimentación, sino que también es un indicativo de la calidad del material que lo constituye; ya que según puede observarse en la ecuación 1, está en función del módulo de elasticidad, densidad y velocidad de onda; así como del área de la sección.

$$Z = (EA/c) = \rho cA \quad (1)$$

Donde,

E = Módulo de elasticidad dinámico

ρ = densidad

c = velocidad de onda en el concreto

A = área de la sección

Un cambio importante en la impedancia del elemento, por ejemplo el debido a una disminución de la sección, se muestra como un aumento de la velocidad y una disminución de la fuerza. En general las reflexiones son más intensas cuanto más lo es el cambio en las propiedades del material o de la sección. Es esta última propiedad la que se sirvió como base para evaluar la condición de la pila ensayada.

5. EJECUCIÓN DE LA PRUEBA

Para verificar la integridad estructural de la 28A se realizó una “Prueba de integridad a gran escala”, con base en lo establecido en la norma ASTM D4945-08, pero no con el objetivo de determinar la capacidad geotécnica de la pila, sino solo su integridad.

Previo al ensayo de la pila A28 se llevó a cabo el mismo procedimiento en un par de pilas donde previamente se habían realizado pruebas de carga estática (Pila 1 y Pila 2), con el objetivo de calibrar el procedimiento y establecer un parámetro comparativo para los resultados en la pila 28A (Figura 8). Únicamente para la pila 28A se colocó una guía metálica con graduaciones para conocer la altura de caída de la masa (Figura 9).

Todas las pilas ensayadas se descabezaron primero y posteriormente se alisaron con mortero de resistencia rápida y control de volumen “grout”. Además, en el caso de la pila 28A el acero de refuerzo se dobló ligeramente hacia afuera para permitir la colocación de la celda de carga en el centro del elemento. Entre la celda de carga y la cabeza de la pila; así como en la parte superior de la celda se colocaron hojas de triplay de $\frac{3}{4}$ ” de espesor como elemento amortiguador.

La celda de carga tenía las dimensiones y peso siguientes: 50 cm de altura, 67.5 cm de diámetro y 700 kg; se instrumentó con cuatro deformímetros que permitieron conocer la carga aplicada (Figura 10). La cabeza de la pila se instrumentó con dos acelerómetros piezo-resistivos que permitieron conocer por la velocidad por medio de integración. Tanto los deformímetros como los acelerómetros se conectaron a un equipo receptor de datos PDA “*Pile Drive Analyzer*” de la empresa Pile Dynamics (Figura 11).

La masa empleada tenía las siguientes dimensiones y peso: 3.5 m altura, 0.95 m de diámetro y 6.5 t de peso (Figura 12). Durante la prueba se dejó caer desde 0.5, 1.0 y 1.5 m de altura. Después de cada caída se verificó el hundimiento de la pila con equipo topográfico (Figura 13).



Figura 8. Ensayos preliminares en pilas 1 y 2.



Figura 9. Masa y guía.



Figura 10. Instrumentación de pila.



Figura 11. Registro de datos con equipo PDA.



Figura 12. Masa de prueba

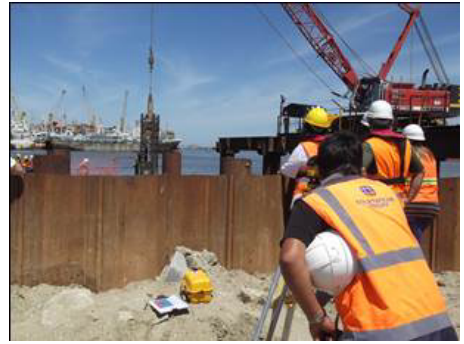


Figura 13. Medición de hundimiento con topografía

Durante la ejecución de la prueba un Ingeniero especialista se conectó vía remota al equipo PDA para verificar adquisición de datos, el esfuerzo inducido a la cabeza de la pila (menor al 70% de la resistencia a la compresión simple del concreto) y tomar la decisión de incrementar la altura de caída o dar por finalizado el ensaye.

6. RESULTADOS

Para la Pila 1 se realizaron dos impactos con alturas de caída de 0.5 y 1m (sin hundimiento). No se evidenció que la curva de velocidad hubiese tenido un aumento considerable sobre la de fuerza, excepto cerca de la punta de la pila. En este caso la masa generó velocidades en los primeros 32m de la pila y después la velocidad gradualmente regresó al reposo. A lo anterior se le denomina falta de activación de carga. Se pudo garantizar la ausencia de defectos en los primeros 32m de longitud.

Para la Pila 2 se realizaron tres impactos con alturas de caída de entre 0.5 y 1m (hundimiento de 1mm). Solo se activó la carga hasta 25m; debido a que esta pila tiene más resistencia por fricción cerca de la cabeza en comparación con la Pila 1 y por tanto, la activación fue menor. Se verificó entonces que no existían problemas estructurales hasta la profundidad mencionada y por debajo de esta profundidad no se evidencia activación de carga.

Para la Pila 28A se realizaron tres impactos con alturas de caída de 0.5 a 1m (hundimiento de 1mm); en este caso, la carga por fuste se logró activar prácticamente en toda la longitud de la pila. Al analizar de la curva fuerza-velocidad vs tiempo (Figura

14) se observa claramente la cabeza de la pila (cresta de la curva de velocidad) donde se aplicó el impacto y la punta de la pila (valle de la curva de velocidad) donde la onda es reflejada. La distancia entre las dos crestas es de 35.9 m que corresponde con la longitud de la pila según los registros de construcción; por lo que se demuestra la continuidad en el elemento. El ajuste casi perfecto logrado entre ambas curvas es evidencia de que no existe un daño, por lo que no fue necesario usar algún modelo numérico para cuantificar algún defecto existente. La ligera separación entre ambas curvas casi a la mitad de la longitud es debida al lodo existente en el fondo, lo cual es consistente con las condiciones geotécnicas del sitio.

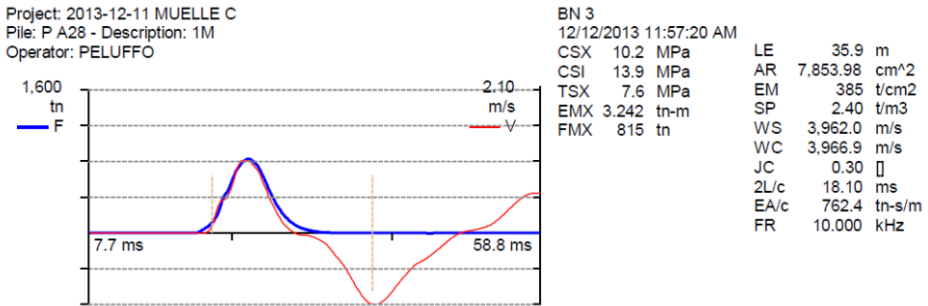


Figura 14. Curva fuerza-velocidad vs tiempo de la Pila 28A

7. CONCLUSIONES

La realización de ensayos dinámicos es un método confiable para determinar la integridad estructural de elementos de cimentación, incluso aquellos con profundidades importantes y en condiciones de difícil acceso.

La realización de pruebas de integridad a gran escala permite obtener señales más claras y confiables que aquellas obtenidas mediante pruebas de baja deformación (ensayos PIT).

La realización de una prueba de integridad a gran escala como la realizada en la pila 28A del muelle multipropósitos C, permite validar la integridad estructural del elemento en cuestión.

8. REFERENCIAS

- [1] ASTM D-4945 (2008). "Standard test method for high strain dynamic testing of Deep foundations"
- [2] Berenguer. (2012). Nota Técnica 3: Pilotaje del "Muelle multipropósito C y dragado del área de maniobras en el puerto de Montevideo".
- [3] Geoproyectos. (2012). Informe Geotécnico "Muelle multipropósito C".

9. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a los dueños del proyecto su autorización para publicar este trabajo, ya que al compartir estas experiencias se beneficia a la comunidad ingenieril. También agradecemos y destacamos la participación entusiasta y con sentido de equipo, de todas las personas que han participado en este proyecto, desde su concepción, revisión y ejecución.