

Fernando Román Buj

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jefe de la División de Ingeniería del Terreno de Intecsa.

Luis Baquedano Sánchez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, División de Ingeniería del Terreno de Intecsa.

RESUMEN: En la hincas de pilotes metálicos para la cimentación de dos puentes de autopista en Canadá se ha empleado como método de control el análisis de la ecuación de la onda registrada mediante el PDA (Pile Driving Analyzer). Mediante este control fue posible comprobar y ajustar el criterio de hincas establecido en el diseño de la cimentación.

1.- INTRODUCCIÓN

La presente comunicación tiene por objeto exponer la experiencia obtenida en el diseño y control de la hincas de pilotes metálicos para la cimentación de dos puentes de grandes luces, situados en la provincia de New Brunswick, Canadá.

Estos dos puentes se incluyen en el proyecto de la Autopista Fredericton – Moncton, y salvan los ríos Saint John y Jemseg.

La sociedad concesionaria de dicha autopista es *Maritime Road Development Corporation* (MRDC), siendo la compañía constructora la agrupación *Janin-DFC*. *Intecsa* ha sido la responsable del proyecto de la cimentación del puente y de la dirección de la obra de dicha cimentación.

Los pilotes empleados fueron perfiles metálicos tipo HP 310 x 174, con un peso de 174 kg/m y una sección de 22.200 mm².

En total se proyectó la hincas de 204 pilotes verticales y 490 pilotes inclinados 3V/1H, lo que hace un total de 694 pilotes.

Como método de control de la hincas se ha empleado el PDA (Pile Driving Analyzer), el cuál permite conocer un límite inferior de la carga resistida por un pilote a través del estudio de la energía captada en los diversos sensores colocados en el mismo.

2.- DESCRIPCIÓN GEOLÓGICA

El terreno en ambos puentes está formado por depósitos aluviales y morrénicos que descansan sobre un substrato Terciario de rocas de origen sedimentario

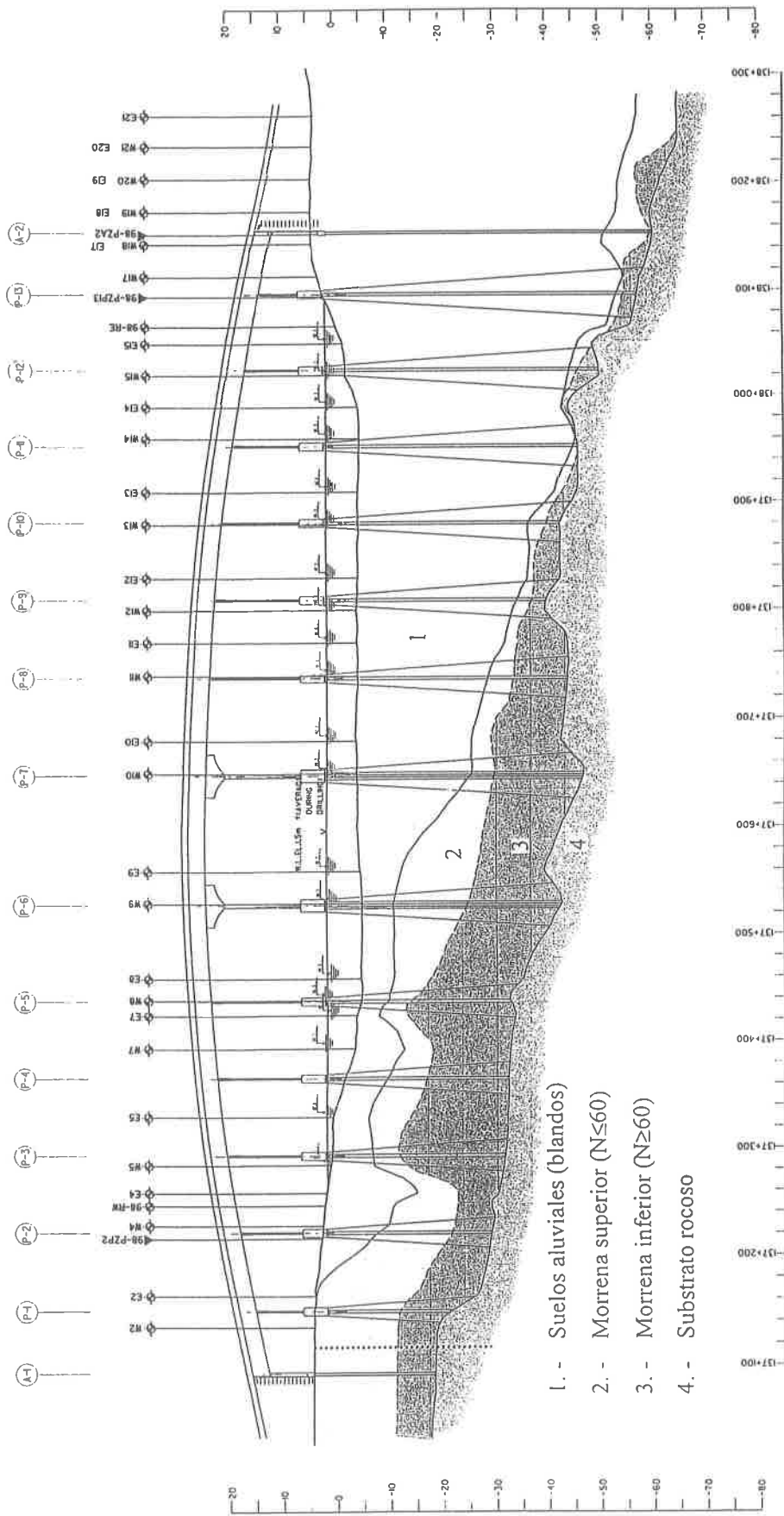
Dentro de los materiales de origen aluvial se pueden distinguir las siguientes unidades:

- Arenas y arenas limosas, formadas por arenas con gravas mal graduadas y poco contenido en finos. En ciertas zonas existía materia orgánica.
- Arcillas limosas y limos arcillosos, con gran contenido de materiales finos y trazas de materia orgánica.

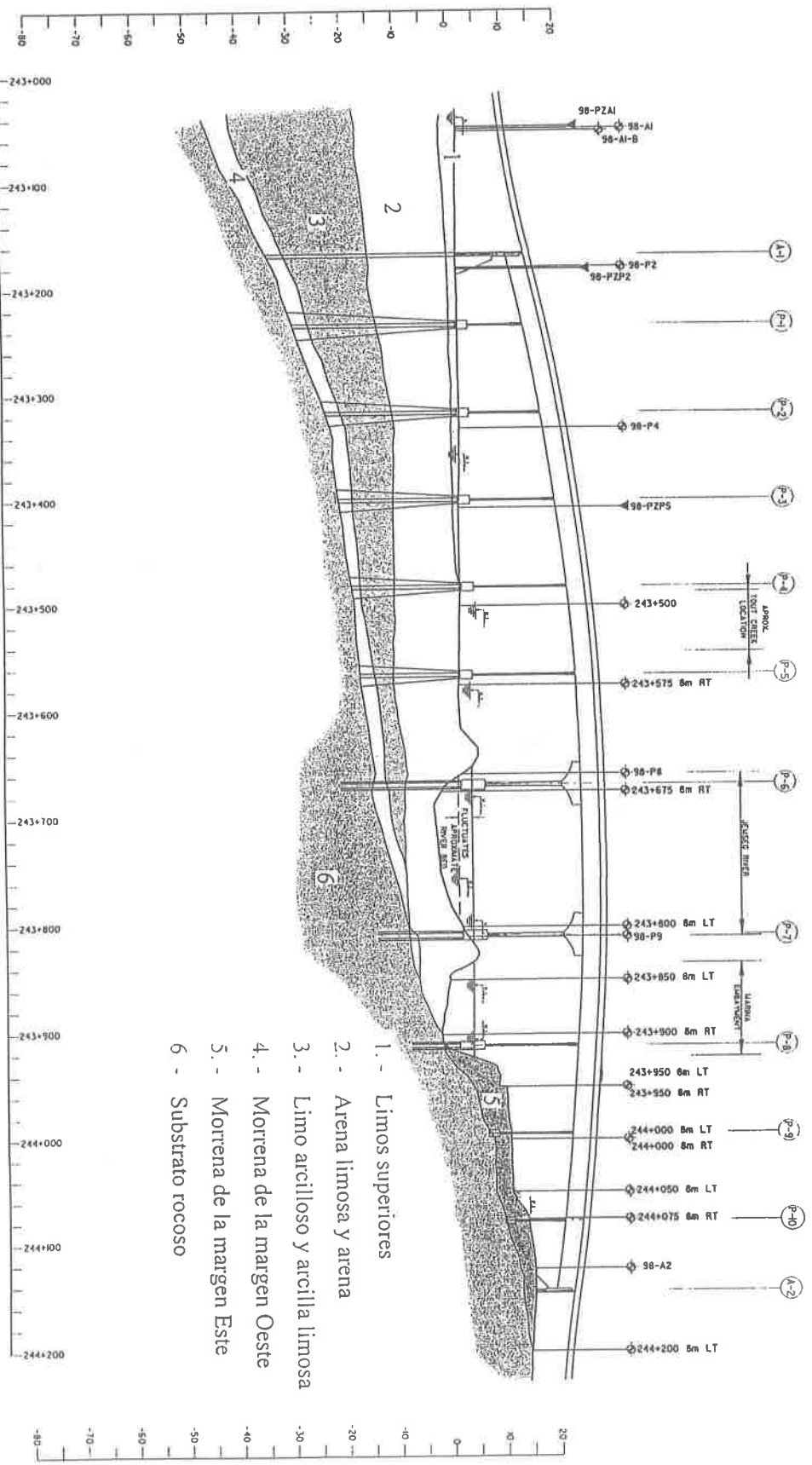
El conjunto de estos materiales se presenta con consistencias o densidades que pueden caracterizarse bien por un SPT variable entre 0 y 10, o bien por una resistencia al corte sin drenaje s_u entre 40 y 80 kPa.

Subyacente a estos materiales se localizan unos sedimentos de origen glaciar (morrenas), consistentes en una acumulación desordenada de partículas de tamaños variados, incluyendo bolos, gravas, arenas y cantidades variables de limos y arcillas. Los metros más superficiales de esta formación presentan una consistencia menor, que aumenta con la profundidad. El SPT medido en estos depósitos morrénicos varía entre 10 y 40 en los primeros metros, aumentando hasta rechazo en profundidad.

El substrato rocoso está formado rocas sedimentarias de origen terciario, dispuestas en una alternancia de argilitas, areniscas y limolitas. Este substrato presenta, en el contacto con los materiales glaciares, unos primeros metros alterados, con



2. - Perfil geotécnico Puente sobre el Jemseg



peores características resistentes. La capacidad resistente del sustrato aumenta bruscamente una vez atravesados estos metros superficiales.

El espesor de los materiales blandos alcanza los 60 m en el puente sobre el río Saint John, siendo del orden de 40 m en el puente sobre el río Jemseg.

El sustrato rocoso presenta varios metros alterados, con peores características resistentes. La capacidad del sustrato aumenta bruscamente una vez atravesados estos metros superficiales.

Dada la baja capacidad de soporte de los materiales superiores, la hincada de la mayor parte de los pilotes ha debido ser llevada hasta el sustrato rocoso, atravesando espesores de suelo de hasta 60 m, como ya se ha indicado. Solamente en algunas pilas del puente sobre el río Saint John el gran espesor de morrenas permitió que la punta se quedara en dicho nivel.

3. - PROCESO DE HINCA Y CONTROL

El proceso comenzaba por la colocación de la plantilla de hincada, en la que mediante una estructura metálica se "marcaba" la posición de los pilotes de cada pila, así como la inclinación de los mismos.

Una vez colocada la plantilla se procedía al "enfildado" del pilote para, posteriormente, realizar una primera hincada. Tras realizar la hincada previa del máximo número de pilotes que no interfiriesen con las operaciones de la grúa, se procedía a la hincada completa de los mismos mediante un martillo más pesado. El martillo empleado en este caso ha sido el modelo B5505, de la casa *Berminghammer Foundation Equipment*. Por motivos de operatividad, en algunas de las primeras pilas construidas la hincada previa se realizó con un martillo más ligero (menor energía) que el que se empleó posteriormente.

Tras la hincada de todos los pilotes de una pila se procedía a la retirada de la plantilla y al hormigonado del encepado.

Dada la heterogeneidad del terreno y el efecto de "timón" inducido por las alas de los perfiles, en algunos casos se produjo una ligera desviación de los pilotes, probablemente en zonas con mayor presencia de bolos. Esto motivaba que al retirar la plantilla se produjese un ligero desplazamiento de la cabeza. En cuatro ocasiones se decidió "puentear" el pilote desviado con dos nuevos pilotes.

El control de la hincada se ha realizado con el PDA (Pile Driving Analyzer), mediante el cual, y a través de la energía medida en los sensores situados en el pilote, se puede obtener un límite inferior de la carga máxima resistida por el pilote.

La carga resistida por punta y por fuste se obtenía tras el procesado en gabinete, mediante el programa de ordenador TNOWAVE, de la información obtenida en campo. Además este trabajo de gabinete permitió ajustar un modelo en un ordenador portátil mediante el cual, conectado directamente a los sensores en el mismo lugar de la obra, era posible avanzar el valor del límite inferior de la carga resistida por el pilote analizado.

La ejecución física del control fue llevada a cabo por la propia *Berminghammer Foundation Equipment*, dirigida técnicamente por *Intecsa*.

En el proyecto de estos puentes se han exigido durante la hincada cargas de hasta 5.600 kN (para cargas de diseño de hasta 2.800 kN).

Los análisis mediante PDA se han realizado en tres situaciones: Al final de la hincada, en rehincada y en "sobrehincada". En total se analizaron con el PDA 29 pilotes verticales (14% de los proyectados) y 33 inclinados (7% de los proyectados).

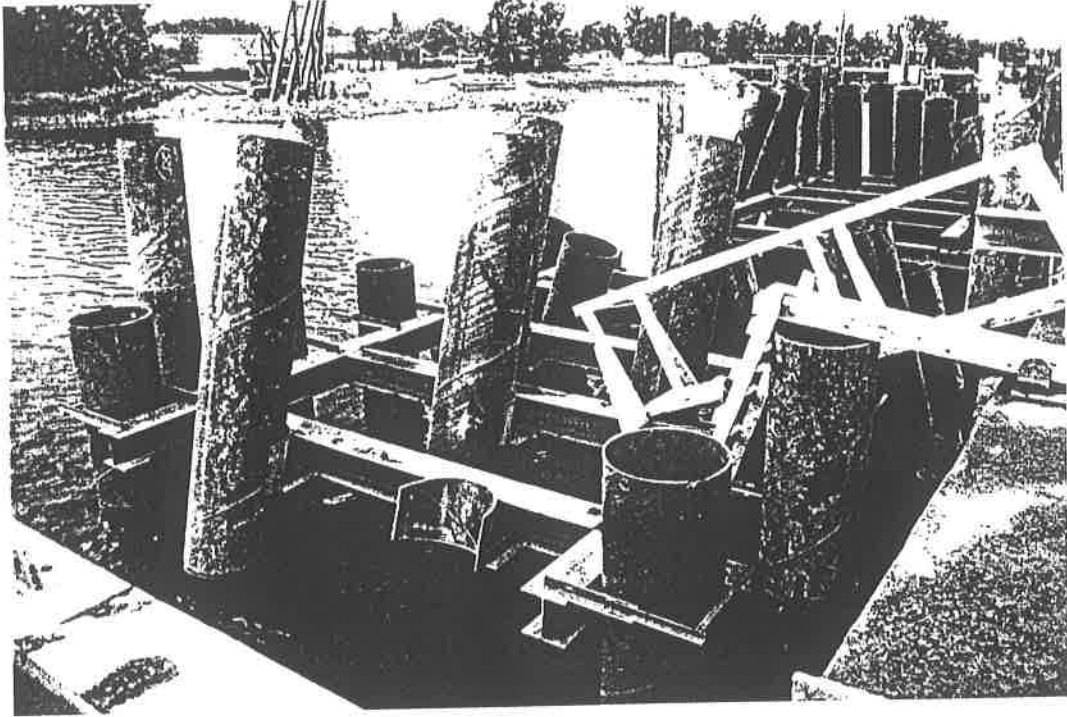
El análisis de pilotes en sobrehincada se realizaron para obtener el valor máximo de la energía que era posible transmitir con el martillo empleado.

El objeto de realizar análisis en hincada y en rehincada ha sido obtener un valor que permitiese estimar la ganancia de resistencia en un pilote al dejarlo "dormir". El tiempo que se dejó dormir los pilotes ha sido como mínimo de 24 h, habiéndose realizado ensayos de hasta 159 h e incluso a 14 días.

El criterio de hincada se determinó inicialmente con un programa de cálculo de hincada de pilotes (GRLWEAP). Posteriormente este criterio se fue comprobando y ajustando a partir de los resultados obtenidos en el campo y posteriormente procesados en oficina. El número de golpes con el cual se consideraba que se alcanzaba el criterio de capacidad se estableció para 25 mm, pero exigiéndose que se alcanzase en tres tandas consecutivas de 25 mm y que en los últimos 250 mm se hubiese alcanzado 10 veces el criterio, es decir, se paraba la hincada para 3 tandas consecutivas de 8 golpes cada 25 mm (por ejemplo) siempre que en los últimos 250 mm se hubiese dado un mínimo de 80 golpes.

4. - CONCLUSIONES

En el control de la hincada de pilotes metálicos el análisis de la ecuación de la onda mediante el PDA (Pile Driving Analyzer) se ha mostrado como un método rápido y efectivo. Gracias a este método ha sido posible realizar un seguimiento bastante completo de la hincada en terrenos blandos, incluso con pilotes de hasta 60 m de longitud.



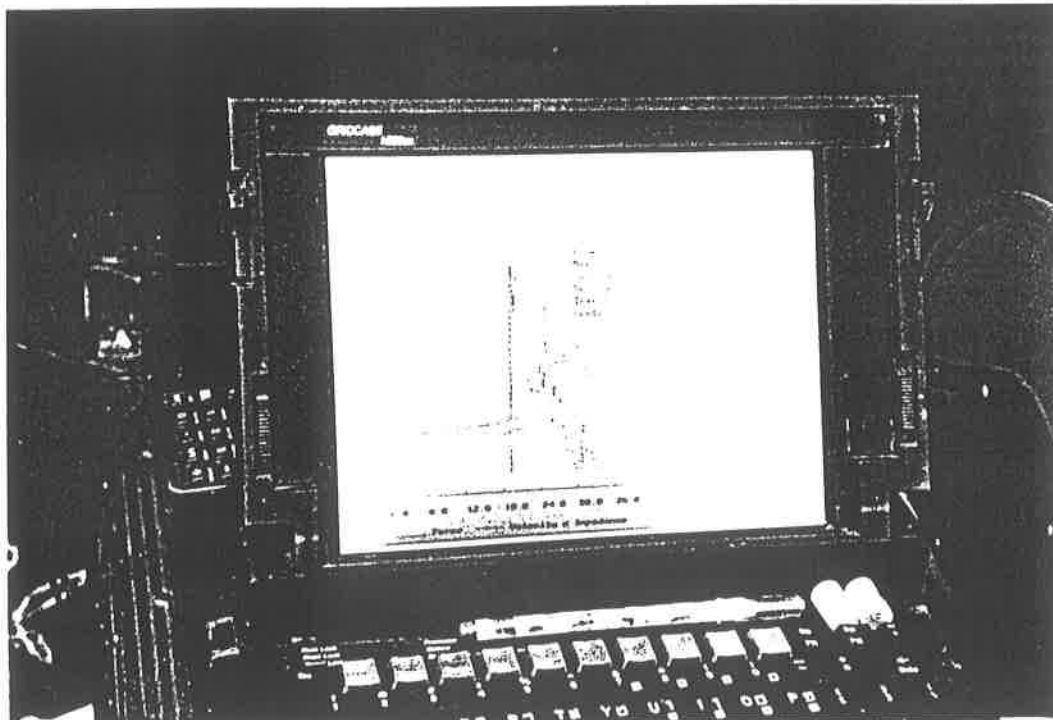
3. - Plantillas para guiado de pilotes en pilas sobre agua



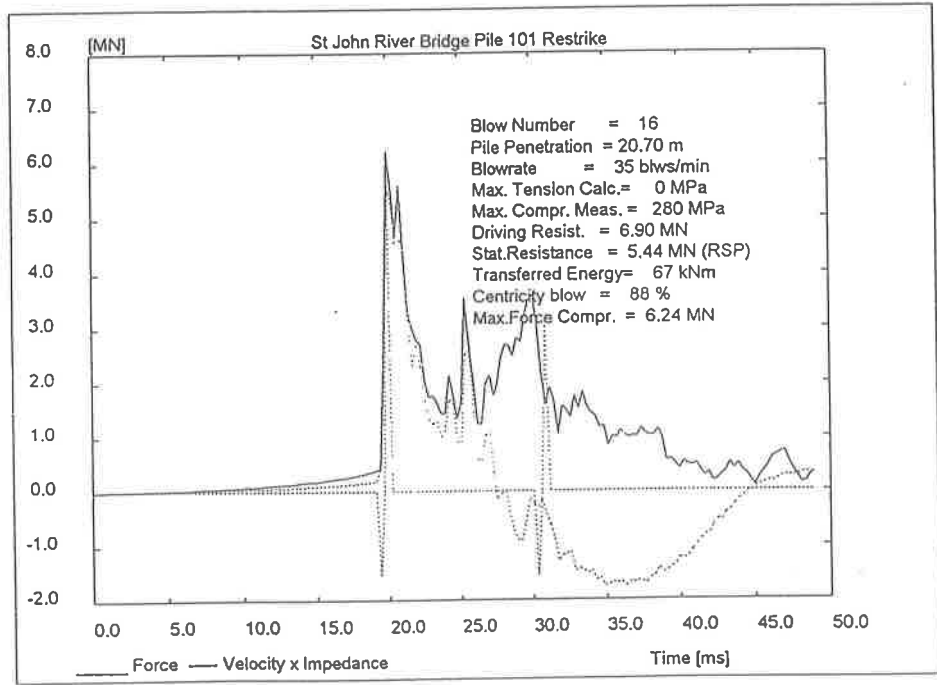
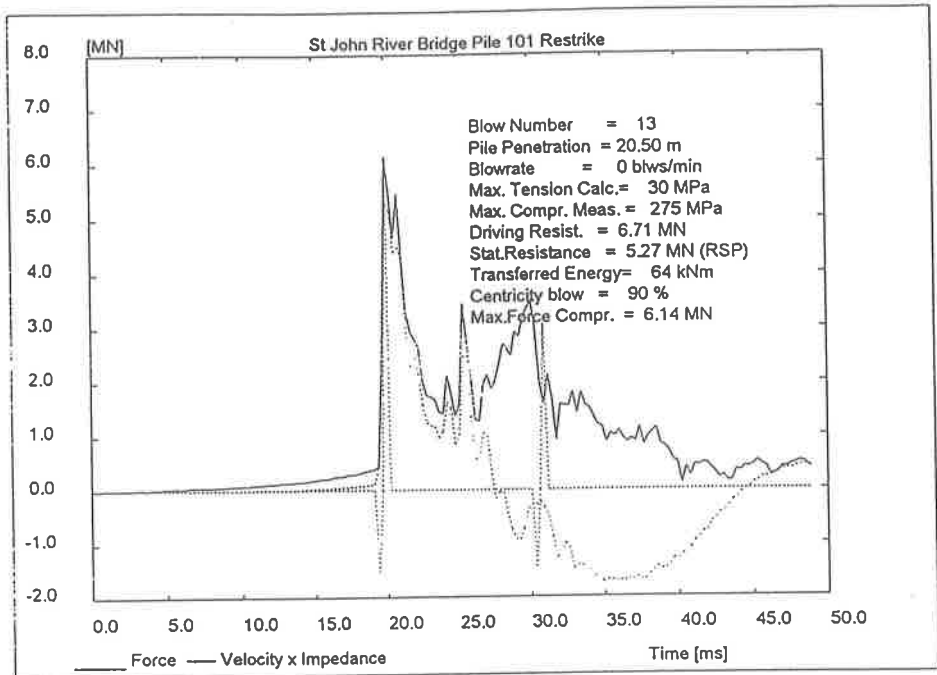
4. - Aspecto de conjunto de pilotes en pilas en tierra, durante la operación de soldadura



5. - Control de la hinca con el PDA



6. - Pantalla con curva procesada in situ con el programa TNOWAVE



7. - Ejemplo de curva procesada

El método de análisis mediante PDA debe ser complementado en gabinete mediante el proceso de los registros obtenidos en campo, a fin de ajustar los resultados. A través de este post-análisis es posible obtener valores de la resistencia por fuste, por punta y de la tensión máxima a que se ha sometido un determinado pilote durante la hinca.

El método de análisis mediante PDA viene limitado por el condicionante de que es necesario movilizar el pilote a fin de obtener los valores de resistencia del mismo. En caso de que no sea posible movilizarlo, caso de quedar el pilote apoyado en su punta en roca, no es posible medir con claridad la resistencia máxima del mismo. En casos así se presentaron fenómenos “ficticios” de relajación del pilote, puesto que los medios empleados en la hinca no eran capaces de transmitir la energía necesaria para movilizarlo.

El mayor beneficio del análisis de la hinca mediante la ecuación de la onda es que ha permitido el establecimiento de criterios de aceptación particularizados para cada tipo de pilote (vertical o inclinado) y para cada tipo de terreno. Así mismo ha permitido el establecimiento de una rutina de trabajo traducida en criterios de análisis de tandas de golpes.

Algunos datos relevantes del proceso y control de hinca pueden resumirse en:

- Longitud de pilotes hincados entre 25 y 65 m.
- Módulos hincados de 18 m, soldados in situ.
- Cargas de trabajo de los pilotes 2800 kN.
- Martillo empleado Berminghammer B5505 Open End Diesel.
- Peso de la maza de 4.172 kg.
- Energía máxima, de acuerdo a especificaciones, 143,4 kJ.
- Coeficiente de eficacia, según especificaciones, 0,80.
- Cadencia de golpeo empleada de 36 a 37 golpes por minuto.
- Criterio de rechazo de hinca: entre 12 y 16 golpes cada 25 mm para los pilotes verticales y entre 15 y 18 golpes en 25 mm para pilotes inclinados, dependiendo de las pilas.
- Tensión máxima durante la hinca del pilote de 324 MPa (94% del límite elástico, 344 MPa).
- Tensión media durante la hinca del pilote inferior al 90 % del límite elástico.
- Porcentaje de ganancia tras 24 horas en morrenas y areniscas, respecto a la resistencia total, entre el 5% y 15%.

- Resistencia por fuste, en relación con la total, para pilotes largos (40 – 60 m), entre el 25% y 30%.
- Resistencia por fuste, en relación con la total, para pilotes cortos (20 – 40 m), entre el 40% y 50%.

5. - AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer la autorización de las empresas MRDC, Janin-DFC y Berminghammer para la publicación de los datos expuestos en este artículo.