

# DESARROLLO CONCEPTUAL DE UN MÉTODO DE CONSOLIDACIÓN CONTROLADA

\*Marcelo Gajardo  
\*\*Gabriel Palma P.

## Resumen

Se describe un método general para resolver el problema de la velocidad segura de construcción segura sobre suelos finos saturados de baja capacidad de soporte. El método se basa en la consideración de condiciones de equilibrio dinámico y en la compatibilidad cinemática del mecanismo de falla potencial. La aplicación del método necesita un fuerte apoyo instrumental, cuyo seguimiento permite reprogramar “on the fly” las etapas de carga del suelo través de la retroalimentación de los resultados.

Se presentan dos ejemplos de aplicación práctica: un modelo de fundación circular rígida de laboratorio, y la interpretación de un registro de consolidación real de un terraplén.

Los primeros resultados permiten confirmar el método. Pero no ofrece ventajas espectaculares en acortamiento de plazos como ocurre con los rellenos livianos. Esta metodología se presenta como alternativa económica y adaptable a las características del suelo, que acepta el uso de materiales normales, y que en algunos casos podría resultar competitiva.

## Introducción

La fundación de estructuras sobre suelos consolidables con baja capacidad de soporte afortunadamente en nuestro país es poco frecuente. La mayoría de los casos se concentran en algunos lugares entre la VII y X regiones.

La principal característica de este tipo de problema es la deformación diferida en el tiempo, la estructura se inclina o se asienta en forma excesiva durante la construcción, algunos días, semanas o meses después de construida, provocando agrietamientos o destrucción de la estructura y obras conexas.

En el caso vial este problema se presenta en terraplenes, por ser obras de gran peso. Son frecuentes los casos de hundimientos de la rasante y alcantarillas, escalonamiento en las losas de acceso a puentes, agrietamientos del pavimento por falla o consolidación del suelo de fundación bajo el terraplén, etc. La problemática de fallas durante la construcción y problemas con los asentamientos diferidos se ha hecho mas frecuente a lo largo de los años por causa del aumento de la velocidad de construcción con el advenimiento de maquinaria mas potente y de mayor capacidad de carga.

Algunas de las soluciones probadas para resolver este problema van desde el envaralado (retícula de varas para el reparto de carga y refuerzo y del suelo), hasta los rellenos livianos de aserrín o poliestireno expandido. Algunas soluciones intermedias son el reemplazo de un espesor de suelo bajo la estructura, refuerzo con geotextiles, drenes verticales, incrustación de bolones, estabilización con cal o cemento, precarga, etc.

El problema clásico al que se ven enfrentados el diseñador y el constructor en estos casos es la falta de información del suelo conflictivo y herramientas para manejar esta información. A nivel internacional la situación no es mucho mejor, todavía la conexión entre los resultados de laboratorio (ensayos de compresión no confinada y consolidación unidimensional) no es del todo clara. Los

---

\* Ingeniero Civil (memorista)

\*\* Ingeniero Civil especialista en Mecánica de Suelos Unidad Laboratorio MOP

diseñadores deben utilizar su instinto, experiencia y hasta alguna información “particular” para manejar estos casos.

Este trabajo tuvo su inspiración en algunas ideas sobre el tema tendientes a racionalizar el control de carga de asentamiento de terraplenes, presentadas durante un curso de Mecánica de Suelos realizado en Tokio en 1997. Dichos conceptos apuntaban hacia la búsqueda de una representación gráfica adecuada de los valores de deformaciones verticales y horizontales, medidas durante la construcción, que permitiera detectar anticipadamente algún principio de falla del suelo de fundación. Hasta esa fecha se probaban distintas hipótesis con resultados que aún requerían de la experiencia y la estadística para el establecimiento de las envolventes de falla.

Este trabajo postula un método racional para el análisis del seguimiento de deformaciones del sello de fundación de un terraplén o cualquier otro tipo de estructura.

## **Planteamiento del Método**

Las hipótesis fundamentales del método son las siguientes:

- i) Las cargas que la estructura aplica al suelo, por ser de naturaleza gravitacional, actúan independientemente de las deformaciones que se produzcan.
- ii) Toda estructura es estable, en particular el suelo, mientras no se superen sus fuerzas resistentes internas máximas.
- iii) Cuando una sección de suelo inicia un proceso de falla es por que las fuerzas solicitantes superan a las resistentes, transformándose en un mecanismo.
- iv) Cuando una estructura estable se transforma en mecanismo, comienza a acelerar.

Como corolario de los puntos iii) y iv) se puede plantear: mientras el suelo tenga la situación controlada, se producirá una desaceleración de los posibles mecanismos de falla después de un incremento de carga. Si pierde el control, se producirá una aceleración del mecanismo declarado después del incremento de carga.

Por lo tanto, bastará con monitorear en función del tiempo las deformaciones verticales y/o horizontales en puntos estratégicamente distribuidos en busca de aceleraciones peligrosas. Estratégicamente distribuidos significa que los puntos de control deben situarse sobre bloques con movimientos compatibles con el tipo de falla normal de esa estructura.

Lo anterior pudiera parecer contradictorio, toda vez que se considera que las estructuras (una fundación, un terraplén, un corte, etc) debieran ser estáticamente estables, quietas, sin movimientos, velocidades, ni aceleraciones. Pero desde un punto de vista físico pueden considerarse con estabilidad cuasiestática, con movimientos muy lentos a lo largo del tiempo. La cuasiestaticidad se pierde cuando se produce la falla.

Observe que no se ha puesto ninguna restricción a la reología del suelo, ni su capacidad de soporte, aunque estas sean cambiantes como en el caso de suelos consolidables (de hecho se endurecen a medida que se consolidan). El método toma en cuenta esto implícitamente al retroalimentar la velocidad de carga en función de los resultados.

## Implementación Práctica

Comienza con la distribución en planta sobre el sello de fundación o fuera de él, según sea el caso, de los puntos de control, materializados con placas o estacas cuyas cotas puedan medirse luego desde la superficie (ver Figura 1). En el caso de fundaciones rígidas pueden escogerse algunos puntos del borde de la estructura.

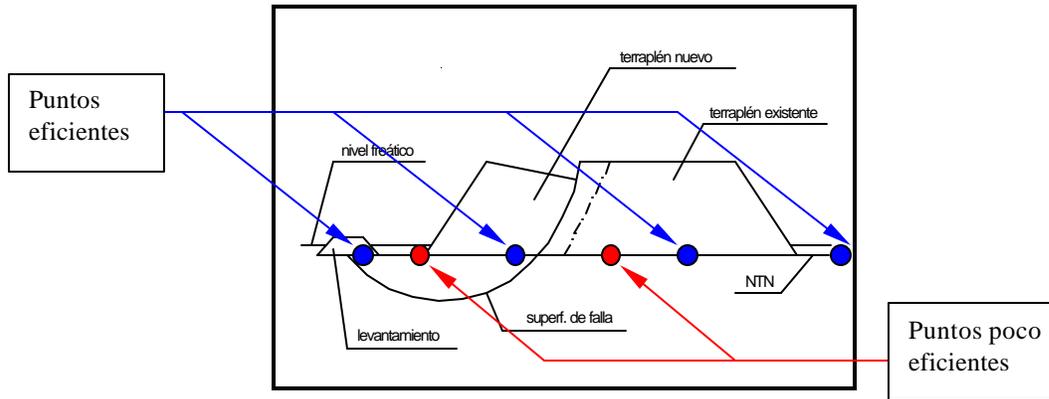


Figura N° 1 Ubicación óptima de los Puntos de Control en un Terraplén

En el caso de un terraplén el espaciamiento entre las secciones de control queda a discreción del diseñador.

La resolución requerida para la medición de las cotas debería ser de 1mm o menos.

La frecuencia de mediciones debería ser la mas alta posible con relación a la velocidad de asentamiento. Idealmente debería ser mas frecuente en el tiempo que sigue a un incremento de carga, pudiendo espaciarse con posterioridad.

La aplicación del primer escalón de carga puede ir apoyado del resultado de la resistencia a la compresión no confinada de muestras inalteradas del suelo de fundación, pero no es estrictamente necesaria.

Del seguimiento se obtienen las trazas de deformación, velocidad, y aceleración vs tiempo, que se actualiza con cada medición y se interpreta de acuerdo al contexto de la curva aceleración vs tiempo.

El aspecto típico de estas curvas es como el que se muestra en las Figuras N°2, 3, y 4.:

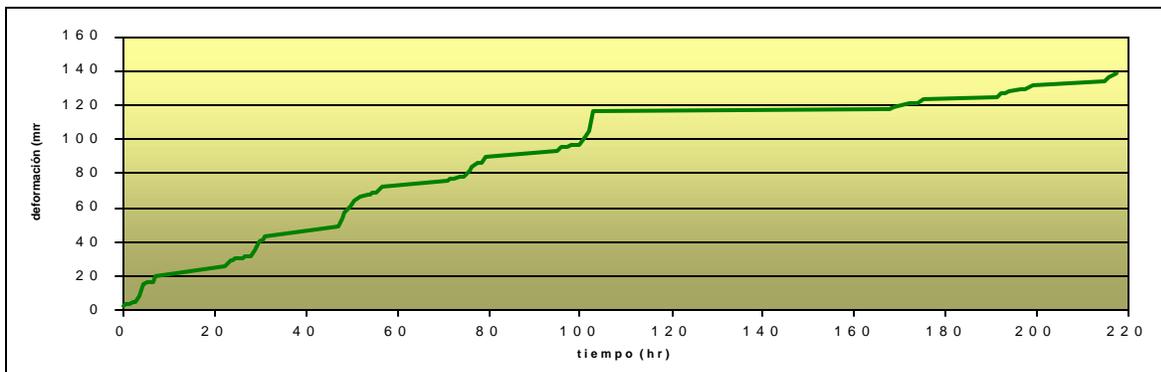


Figura N°2. Trazas de deformación vs tiempo

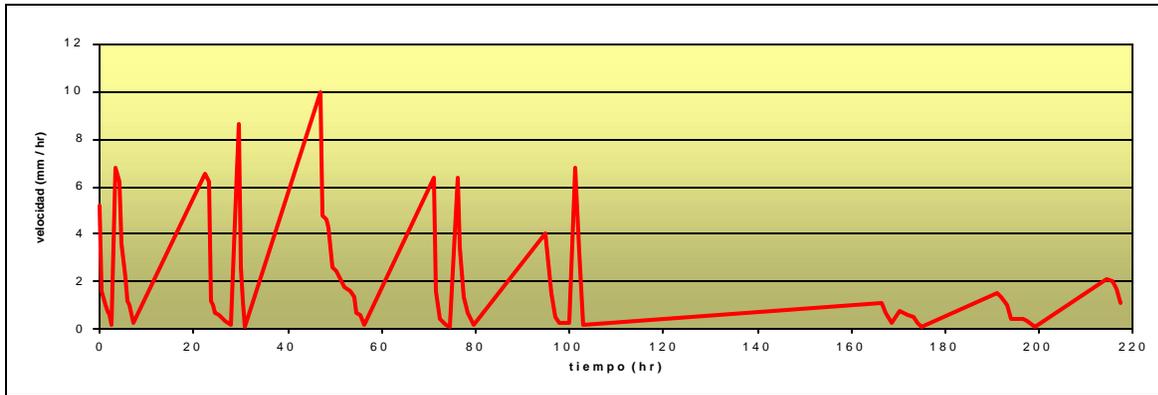


Figura N°3. Traza de velocidad vs tiempo

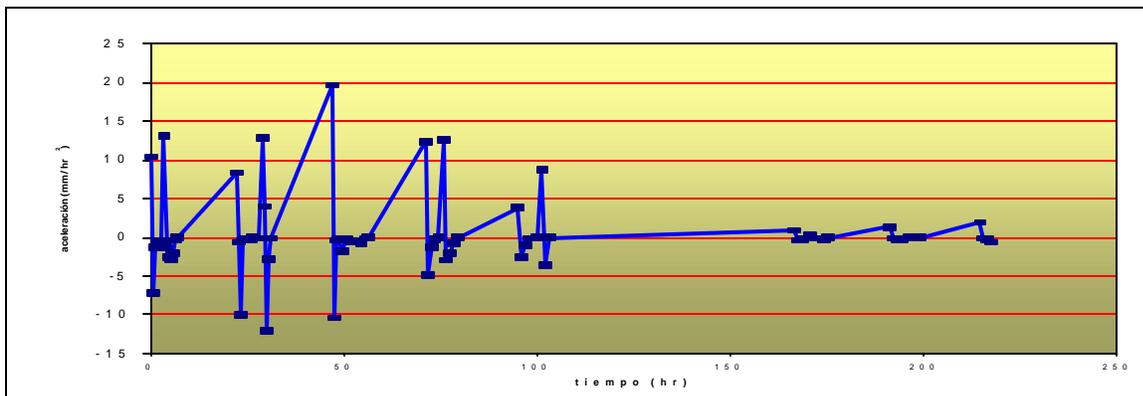


Figura N° 4. Traza de Aceleración vs tiempo

## Interpretación

Las reglas de interpretación de la traza aceleración vs tiempo son sencillas:

- Si la traza permanece mucho tiempo en la zona negativa (desaceleración), se está produciendo la consolidación, es una situación segura, pero se están generando tiempos muertos. Es posible aplicar otro escalón de carga.
- Si la traza oscila entre las zonas positiva y negativa se está en un estado de avance óptimo
- Si la traza permanece en la zona positiva (aceleración), corresponde a un estado peligroso, con alta probabilidad de ocurrencia de falla. Es necesario detener el aumento de carga, y posiblemente disminuir la magnitud de los próximos escalones de carga.

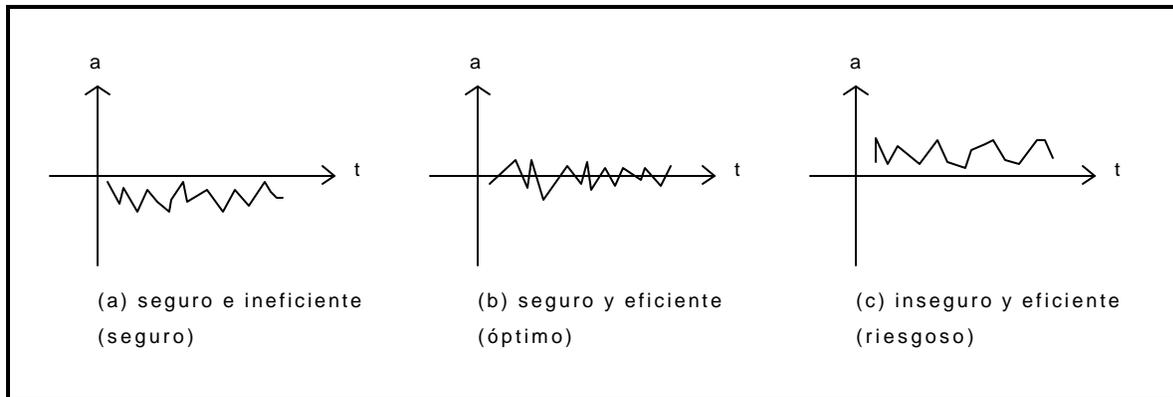


Figura N°5. Interpretación de las trazas de aceleración vs tiempo.

Es necesario tener en cuenta además que el signo de las aceleraciones tiene sentido según la convención adoptada y la concordancia con los movimientos del mecanismo de falla planteado.

### Ejemplos de Aplicación Práctica

Caso 1: Modelo de Laboratorio del caso de una fundación circular rígida sobre suelo fino saturado de baja capacidad de soporte. Corresponde al de las Figuras N° 2, 3, y 4. De las cuales se reproduce la Figura N°4 para su consideración:

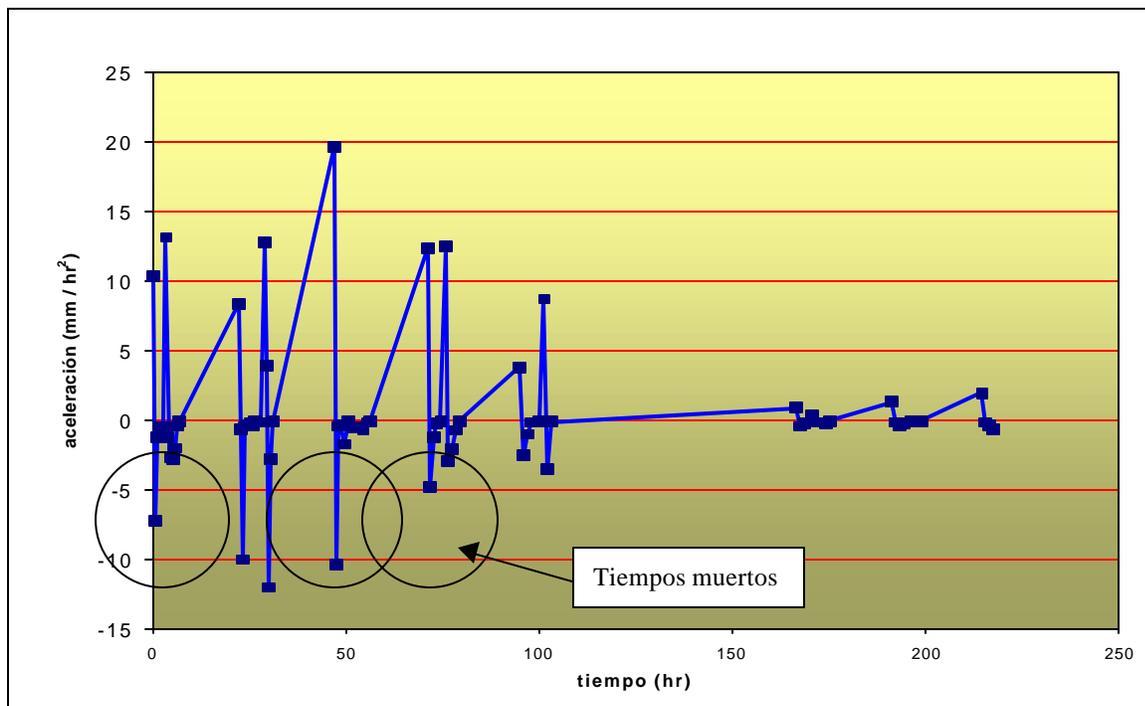


Figura N°6. Trazas de aceleración de una Consolidación modelada en Laboratorio

En esta prueba no se registró falla del suelo, lo que se confirma al observar la incursión de la traza sobre el cuadrante I del gráfico. En cambio, se produjeron tiempos muertos, desde un punto de vista constructivo, en los que se habría podido aplicar incrementos de carga sin riesgo, acortando hipotéticamente los plazos construcción.

Caso 2: Análisis de un caso real. Se trata de un punto de un terraplén de acceso al Paso Superior Loncoche de la ruta Temuco-Río Bueno. En este caso se hizo seguimiento de cotas semanal a placas ubicadas bajo el terraplén a medida que se cargaba a ritmo variable.

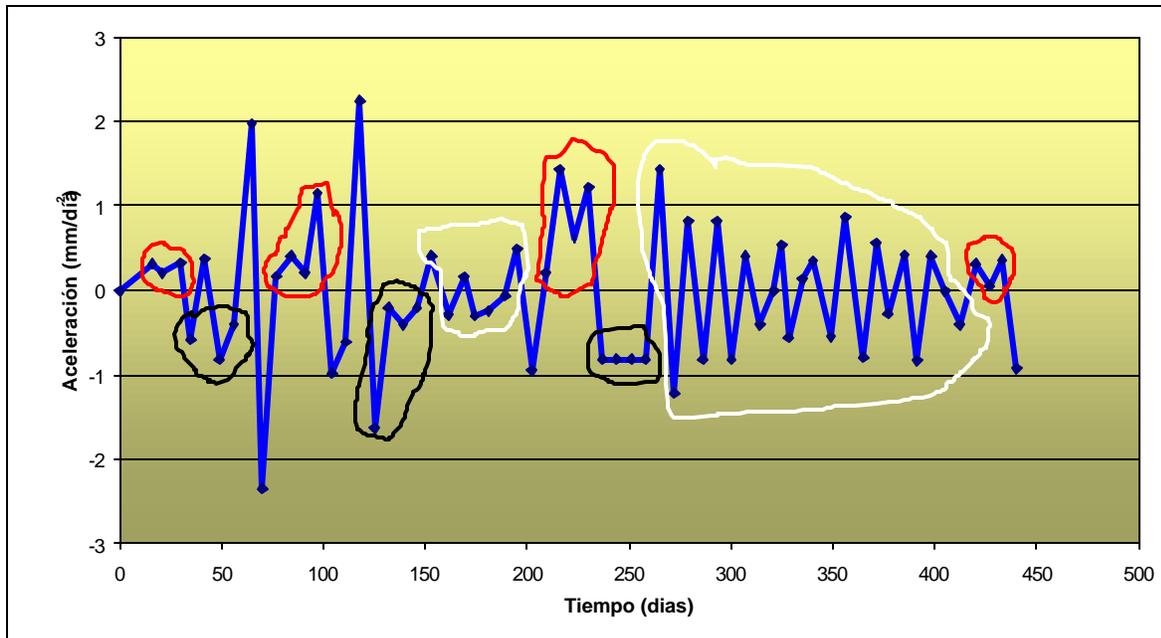


Figura N°7. Traza de Aceleración de un punto controlado en Terraplén de acceso al Paso Superior Temuco-Río Bueno.

Aplicando las reglas para la interpretación de la traza de aceleración es posible distinguir los tres casos posibles: encerrados en negro los tramos con tiempos muertos, en blanco los de avance óptimo, y en rojo incursiones en zonas con riesgo de falla.

## Conclusiones

El método se basa en consideraciones dinámicas y cinemáticas sencillas y es de fácil comprensión y aplicación. El grado de aseguramiento contra fallas que ofrece está en proporción a la densidad de puntos controlados.

El estado de avance óptimo definido (con cruces alternados y frecuentes por cero) resultaría implícitamente conservador, al considerar la traza de la Figura N°7. Puede apreciarse algunas incursiones sostenidas en el campo de aceleraciones positivas que representan lapsos de hasta un mes en que el suelo de fundación se vio bastante exigido y sin que se produjeran fallas.

La aplicación de esta metodología no ofrece acortamientos de plazo muy espectaculares. En cambio ofrece una forma de cierto modo “natural” de saber si el estado de tensiones impuesto al suelo pone en peligro la obra, indicando los momentos propicios para un nuevo avance.

Este método podría resultar inconveniente para efectos de una planificación ordenada de las fases constructivas, puesto que no se conoce con antelación la curva de avance que podría tener la actividad. De alguna manera es equivalente a una improvisación sistemática, pero que se adapta mejor a las capacidades del suelo.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen muy especialmente la colaboración prestada por don Miguel A. Collao de la empresa constructora Ferrovial.

## **Bibliografía**

1. Japan International Cooperation Agency. “Soil Mechanics and Foundation Engineering”, Tokio 1997
2. T. W. Lambe - R. V. Whitman. “Mecánica de Suelos”. México 1974
3. Dusan Dujisin – Jorge Rutllant. “Mecánica de Suelos en la Ingeniería Vial”, Santiago 1974
4. Revista Obras Públicas – N° 23, – Artículo, “Terraplenes Livianos como Solución a Problemas Especiales de Fundación”, Santiago 1999