

PRUEBAS DE CARGA A ESCALA NATURAL EN RIELES DE GRUAS

Mauricio POBLETE*

Pedro ORTIGOSA*

Eugenio RETAMAL*

RESUMEN

Se entregan los resultados de pruebas de carga a escala natural realizadas en rieles de grúas del Puerto de Antofagasta, Chile, que se fundan sobre un relleno granular con bloques y bolones angulosos a través de una viga de hormigón sin armar. Se midieron deflexiones en puntos predeterminados de los rieles en vacío (sin carga) y posteriormente solicitados por una grúa cargada al máximo de su capacidad. Los resultados muestran que el sistema se comporta efectivamente como una viga en fundación elástica, cuyas rigideces de viga y suelo se infieren. Se analizan los efectos de agrietamientos transversales sistemáticos observados en el hormigón de la viga, concluyéndose que las superficies de ruptura, al ser irregulares, preservarían la transmisión de corte a través de las grietas por simple trabazón mecánica.

INTRODUCCION

El Puerto de Antofagasta, administrado por la Empresa Portuaria de Chile, mantuvo en operación en el Malecón de Costa, 8 grúas móviles marca Applevage

* Ingeniero investigador del IDIEM.

de 5 t de carga máxima en la pluma, las cuales se decidió reemplazar por grúas Macosa de 10 t. Las grúas primitivas se apoyaban sobre rieles mediante 4 ruedas metálicas por riel descargando al subsuelo, a través de una viga de hormigón sin armar, una presión máxima estimada de 2.8 kg/cm^2 . Las grúas de reemplazo tienen 8 ruedas por riel y descargan una presión máxima estimada de 3.5 kg/cm^2 . En el cálculo de esas presiones se tomó en cuenta el peso propio, la carga máxima en la pluma en su posición más crítica y una sollicitación de viento de diseño¹.

Considerando la mayor presión esperada en el sello de fundación de la viga y ciertos desalineamientos verticales mensurables en los rieles existentes, que pudieran atribuirse a deformaciones diferenciales del subsuelo, se hizo necesario un estudio de mecánica de suelos con el objeto de evaluar las condiciones del conjunto riel-fundación-subsuelo para el apoyo de las nuevas grúas. Ello se cumplió mediante la inspección de pozos de reconocimiento excavados junto al riel de tierra y al borde del molo, obteniéndose la estratigrafía que se presenta en la Fig. 1.

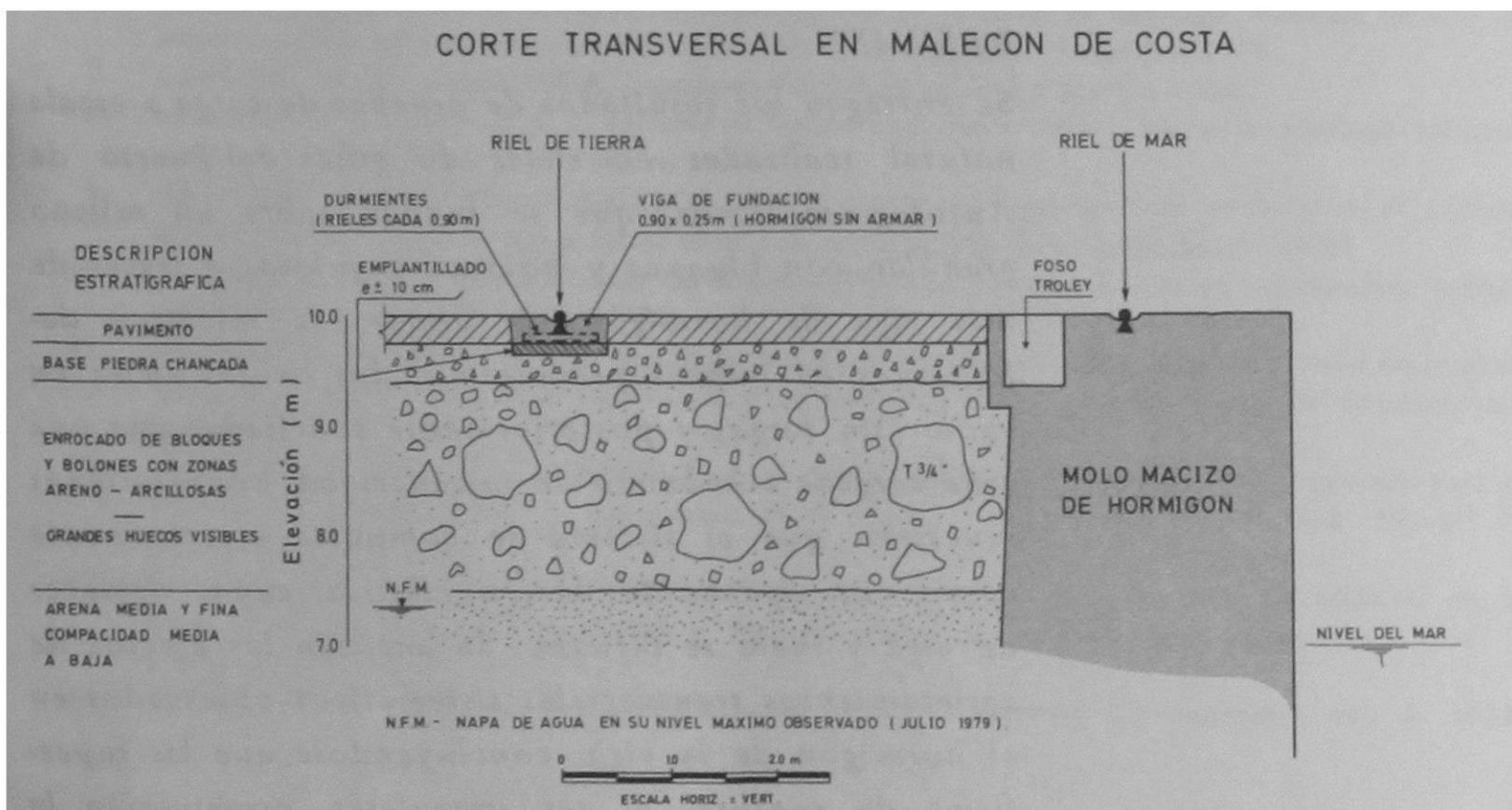


Fig. 1. Estratigrafía típica y disposición de rieles de grúa móvil.

Considerando además la heterogeneidad del subsuelo y la circunstancia de que éste se encontraría trabajando en un régimen de deformación elástico, estabilizado por el repetido tránsito de las grúas Applevage durante un largo tiempo de operación, se programaron pruebas de carga de los rieles. Estas pruebas se efectuaron con la máxima sollicitación que fue posible obtener por medio del peso propio y carga de una de las grúas Applevage. En esta forma las deformaciones de los rieles, medidas en puntos próximos a las ruedas de apoyo permitirían inferir la constante de balasto asociada al sistema riel-viga-suelo.

Las citadas deformaciones fueron determinadas por medio de nivelaciones topográficas de precisión en puntos seleccionados de los rieles, primeramente en vacío y luego con las cargas actuantes. El número total de pruebas fue de 29 y se distribuyeron uniformemente cada 20 m en una longitud de alrededor de 600 m². Para las nivelaciones se utilizó un nivel geodésico automático, Zeiss Jena Ni 002, con placa plano paralela incorporada y trípode de patas fijas para mejor estabilidad; además se utilizaron miras geodésicas Invar afirmadas en bípodes. Como PR's se emplearon clavos inoxidable de cabeza aproximadamente esférica, que fueron fijados al hormigón del molo mediante un martillo Hilti DX 400 B; sus cotas se obtuvieron por nivelación cerrada independiente, con una precisión lograda de ± 0.05 mm en la cota de cada PR nivelado.

NIVELACION DE RIELES EN VACIO

La nivelación de los rieles se efectuó apoyando las miras directamente sobre la superficie de rodado del riel, el cual debió limpiarse previamente en forma cuidadosa a fin de eliminar suciedades que pudieran inducir a error en las nivelaciones. Esta limpieza se efectuó antes de las mediciones mediante una grata metálica (chascón) accionada por un taladro eléctrico. Antes de cada lectura se procedió a una limpieza adicional del contacto entre la mira y el riel mediante un huaípe con diluyente.

A fin de posibilitar las lecturas de nivel de los rieles en vacío y después con carga sobre los mismos puntos, se premarcaron en los rieles los puntos seleccionados de nivelación, correspondientes a cada una de las 29 posiciones previstas de la grúa para la nivelación *con carga*. Así, en el riel de tierra se marcaron 5 puntos distintos denominados 1-2-3-4-5 a distancias fijas del centro de la grúa, tal como se señala en la Fig. 2. En el riel del mar se marcaron a su vez 3 puntos distintos denominados 6-7-8 ubicados en igual posición relativa que los puntos 5-3-1 respectivamente. Las posiciones de grúa fueron elegidas siempre equidistantes de dos PR's a fin de efectuar las nivelaciones con distancias mínimas de puntería; en el caso de la Fig. 2 los puntos 1-2-8 fueron nivelados respecto al PR 140, los puntos 4-5-6 respecto al PR 120 y los puntos 3-7 indistintamente a uno u otro PR.

Las cotas se leyeron con todas las cifras del instrumento y se calcularon a 0.1 mm, con un error estimado de ± 0.05 mm. A modo de comprobación de la exactitud, un sector de los rieles se niveló en vacío dos veces y con un intervalo de tiempo entre las nivelaciones, en el cual pasó una vez la grúa. Como resultado se encontró, en ambos rieles, una diferencia de cotas de hasta 0.2 mm entre las nivelaciones, lo que se atribuye a diferencias en los puntos de apoyo de la mira y posiblemente también a una sujeción imperfecta de los rieles al hormigón de base. Esto último fue comprobado al observarse soldaduras

cortadas en al menos un punto del riel de mar que fue investigado especialmente, evidenciando ascensos verticales atribuibles, entre otras causas, al pandeo del riel durante expansiones térmicas.

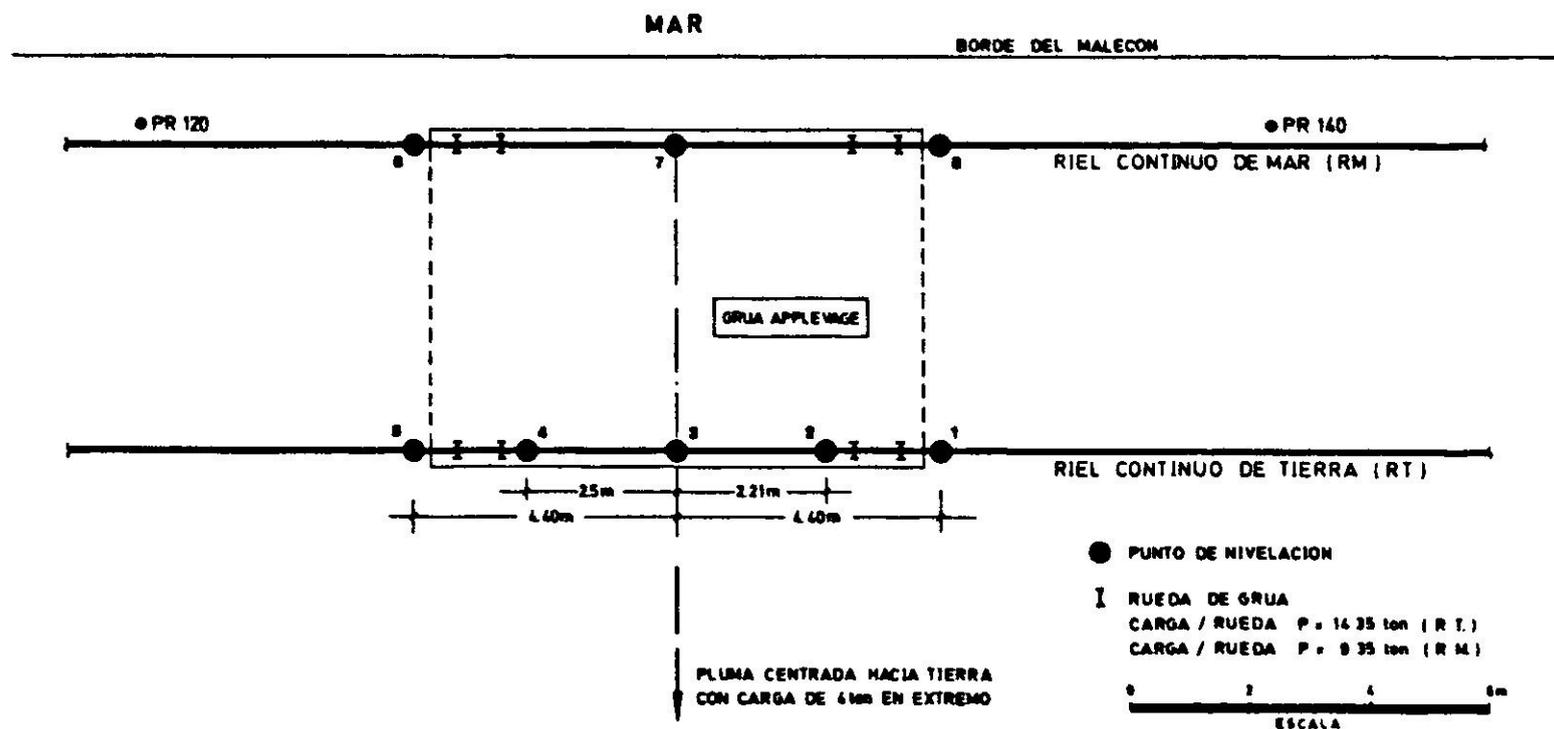


Fig. 2. Planta con ubicación de puntos de nivelación rieles.

Como subproducto de las nivelaciones de los rieles en vacío fue posible apreciar que los niveles de ellos trascurrían más o menos en conjunto, pero siguiendo líneas irregulares. Así mismo, al verificar el alineamiento de los rieles y del borde del molo respecto de una línea recta base materializada especialmente en el hormigón, se detectaron diferencias significativas en la trocha, conjuntamente con un alineamiento irregular de los rieles, en contraste con un alineamiento aceptable del borde del molo a lo largo de todo su desarrollo. Teniendo en cuenta que el riel de mar puede considerarse para estos efectos solidario al hormigón del molo, y no habiéndose evidenciado en este último desplomes ni asentamientos significativos, se dedujo que los desalineamientos verticales y horizontales de ambos rieles, así como las diferencias observadas en la trocha, serían atribuibles a deficiencias en la instalación primitiva de los rieles más que a movimientos irregulares del suelo de fundación.

NIVELACION DE RIELES CON CARGA

Para los mismos puntos nivelados en vacío y previa limpieza de los rieles, se tomaron los niveles de la superficie de rodado con la solicitud del peso propio de la grúa más una carga de 4 t colgada en la pluma a una distancia de 15 m de riel de tierra, Fig. 2.

Las elásticas del riel de tierra, obtenidas por diferencias de cotas entre las nivelaciones con carga y en vacío en 6 posiciones de grúa típicas de entre las

29 que se controlaron, se presentan en la Fig. 3. Se observa que en todos los casos las mayores deflexiones ocurren en los puntos 1,2 y 4,5 cerca de las ruedas de la grúa y, las menores, en el punto 3; lo que está cualitativamente en concordancia con la clásica teoría de vigas en fundación elástica formulada por Hetenyi³. A fin de visualizar mejor esta correspondencia se confeccionaron las Figs. 4 y 5 que resumen las deflexiones medidas en el riel de mar y en el riel de tierra para las 29 posiciones de grúa controladas.

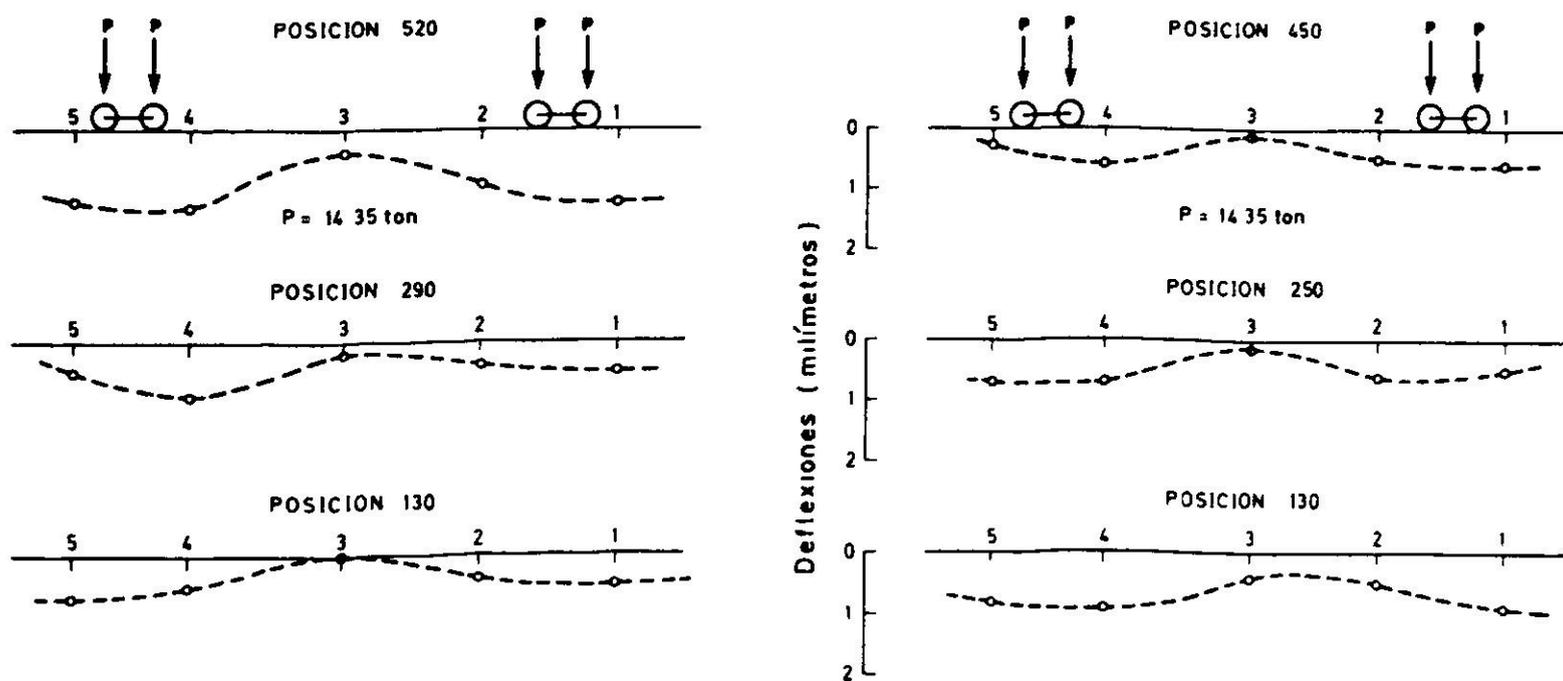


Fig. 3. Elásticas típicas medidas en riel de tierra.

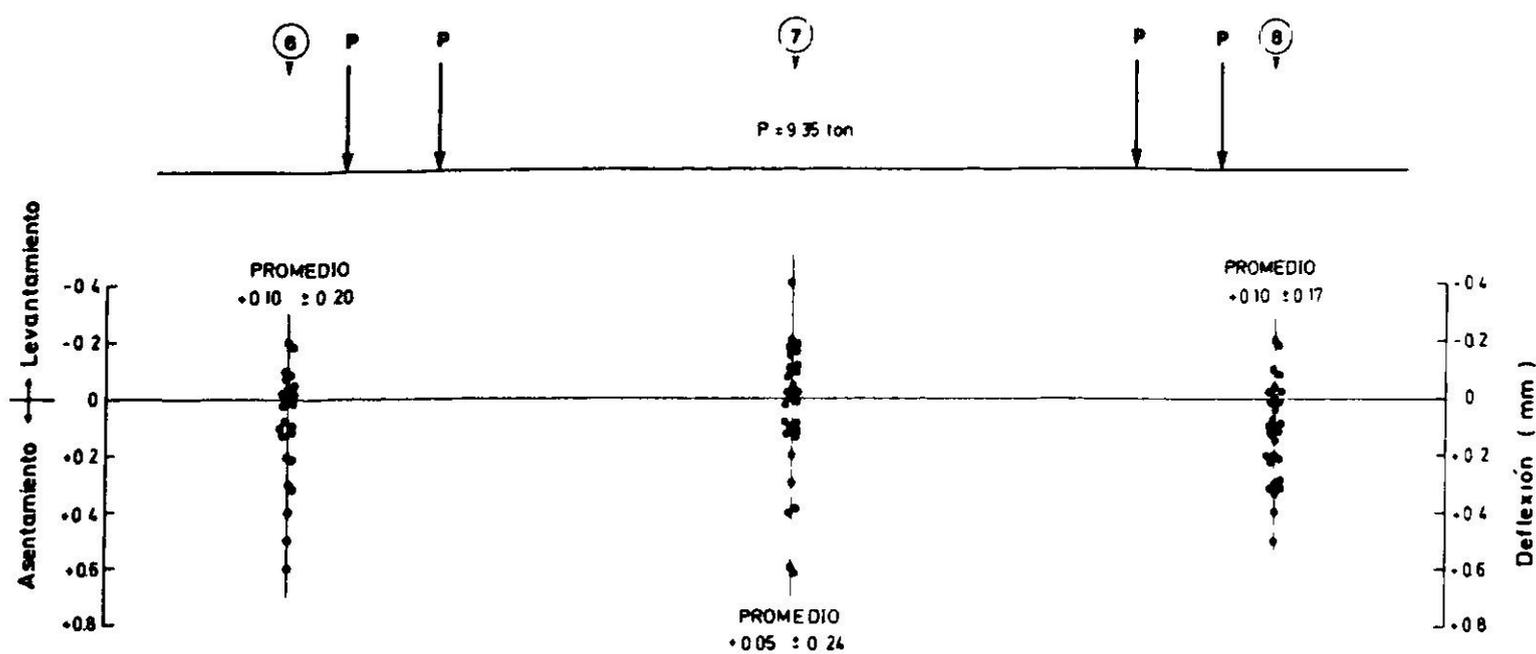


Fig. 4. Resumen de deflexiones medidas en riel de mar.

En la Fig. 4 puede verse que los puntos 6, 7, 8 correspondientes al riel de mar, experimentan variaciones poco significativas de cotas con un promedio de asentamientos del orden de (0.05 a 0.10 mm), y desviaciones probables de ± 0.2 mm. Estas deflexiones estarían reflejando más bien los acomodos del riel en su apoyo contra el hormigón del molo por efecto de una sujeción imperfecta

ya discutida anteriormente. En todo caso la magnitud de estas variaciones de cota en el riel de mar avalan la exactitud de $\pm (0.1 \text{ a } 0.2) \text{ mm}$ con que se midieron las deformaciones en el riel de tierra.

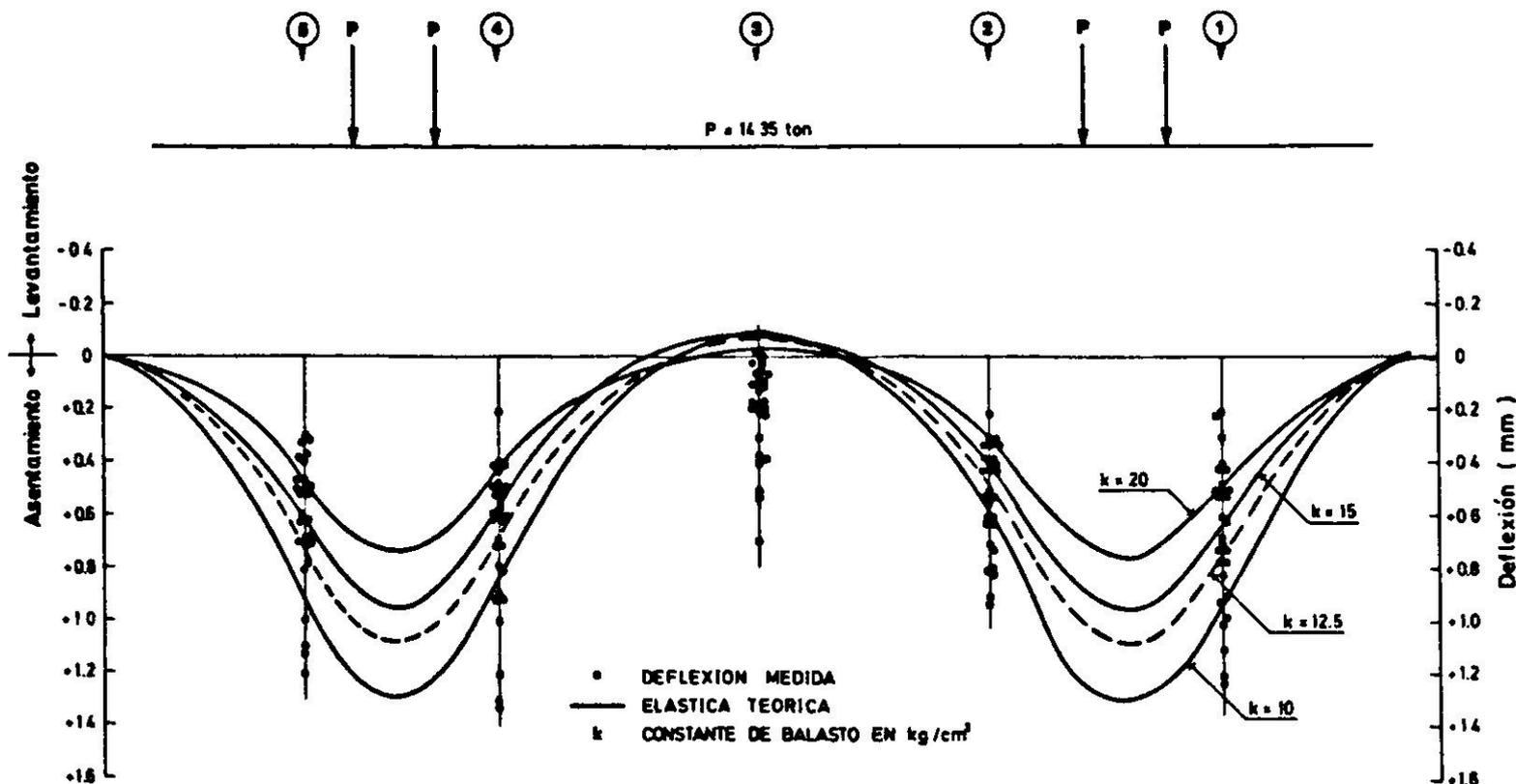


Fig. 5. Resumen de deflexiones medidas en el riel de tierra y elásticas teóricas para viga de $0.90 \times 0.25 \text{ m}$ de sección.

INTERPRETACION DE RESULTADOS

Con referencia a la estratigrafía típica de la Fig. 1 y a las deflexiones medidas en el riel de tierra que aparecen graficadas en la Fig. 5, puede decirse que ellas son efectivamente atribuibles a la compresión del sistema de apoyo del riel, integrado por una viga de hormigón sin armar, una base granular compactada y el relleno de enrocados.

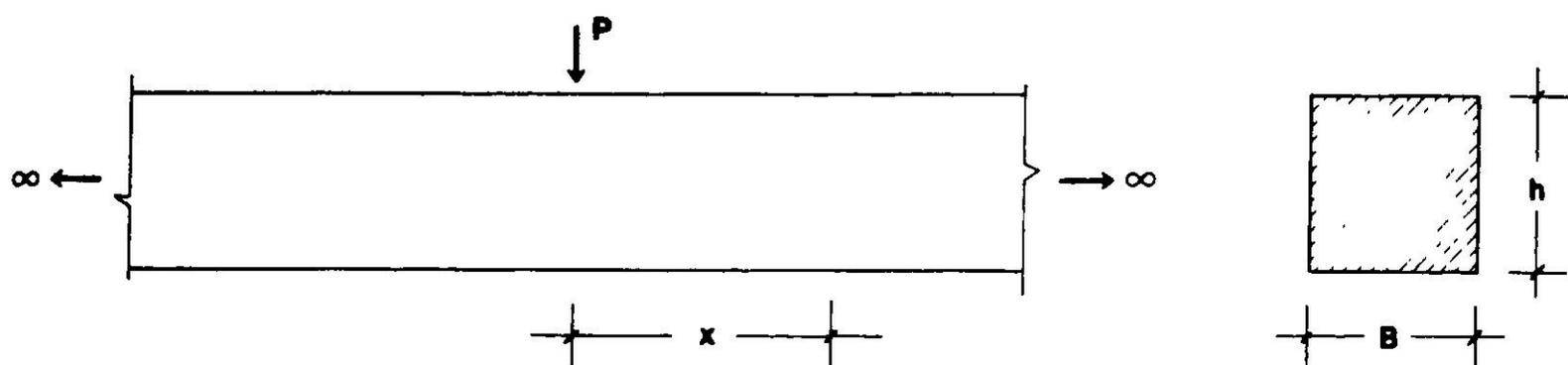
Cabe hacer presente que la viga de hormigón en la que se encuentra embebido el riel de tierra, muestra en el terreno un agrietamiento transversal sistemático cada 0.90 m en promedio, Fig. 6, lo que sería coincidente con la existencia de trozos de riel colocados transversalmente a modo de durmientes, también embebidos en el hormigón (ver Fig. 1). Este agrietamiento había sido previsto en un estudio teórico previo basado en la aplicación de la clásica teoría de vigas en medio elástico¹. Dicho estudio, que modeló la viga de hor-



Fig. 6. Riel de tierra con agrietamiento transversal sistemático cada $0.90 - 1.0 \text{ m}$ de espaciamiento.

migón sin considerar la existencia de durmientes concluyó que el esfuerzo de tracción en la fibra inferior de dicha viga sería suficiente para motivar su ruptura (agrietamiento). Las observaciones efectuadas posteriormente en terreno con motivo del presente trabajo confirmaron dicha conclusión, observándose que las grietas aparecían en las secciones más débiles a la flexión longitudinal, como es el contacto hormigón durmiente. Sin embargo, el agrietamiento también se detectó en las fibras superiores y con aberturas comparables (0.3 a 0.4 mm), lo cual sugiere la existencia de esfuerzos de tracción en toda la sección transversal del hormigón, por causas que podrían atribuirse a repetidas compresiones y dilataciones térmicas, además de las flexiones por las cargas de las grúas. Respecto a esta última causa se hace notar que, si bien la grieta de flexotracción se originó en la fibra inferior, la sección quedó debilitada y, por lo tanto, al ser sometida a tracciones en la fibra superior se habría desarrollado allí la grieta correspondiente*. Como la sollicitación es de naturaleza cíclica debido al sucesivo paso de las grúas, con el transcurso del tiempo se habría originado el agrietamiento completo de la sección de la viga.

A fin de visualizar y comprender el mecanismo de trabajo del sistema de fundación del riel, se determinaron las elásticas teóricas utilizando la clásica teoría de vigas en fundación elástica, con diferentes secciones de viga y constantes de balasto del suelo. De acuerdo a dicha teoría, para una viga de gran longitud, la deformación vertical y de un punto ubicado a una distancia x de una carga puntual P es:



$$y = \frac{P}{\sqrt{2}} \frac{\lambda}{B k} e^{-\lambda x} \text{sen} (\lambda x + \pi/4)$$

en que

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{kB}{4EI}}$$

k = Constante de balasto del suelo de apoyo

B = Ancho de la viga en contacto con el suelo

* Debido a que se trata de cargas móviles, una misma sección puede estar sollicitada por tracción en su fibra inferior o superior, dependiendo de la posición relativa que esta sección tenga con respecto a las ruedas de la grúa.

h = Altura de la viga

E = Módulo de elasticidad del material de la viga

I = Momento de inercia de la viga respecto a su fibra neutra

Considerando una viga de hormigón con un ancho igual a 0.90 m y una altura de 0.25 m, que corresponden a las dimensiones de proyecto verificadas con los pozos de exploración, resultan las elásticas que se muestran en la Fig. 5 para varios valores de la constante de balasto del suelo. Al superponer estas elásticas con las deflexiones medidas puede observarse que en realidad la viga de hormigón se comporta como un elemento más rígido que lo supuesto, a pesar del sistemático agrietamiento transversal que la haría teóricamente más flexible en el sentido longitudinal. En efecto, si el cálculo se efectuara considerando una sección de viga con el ancho de 0.90 m y una altura de 0.40 m se obtiene un mejor ajuste con las deflexiones medidas, tal como se aprecia en la Fig. 7. Cabe señalar que la altura de 0.40 m es incluso superior a la que resultaría si se considerara colaborante la sección del emplantillado de hormigón (ver Fig. 1).

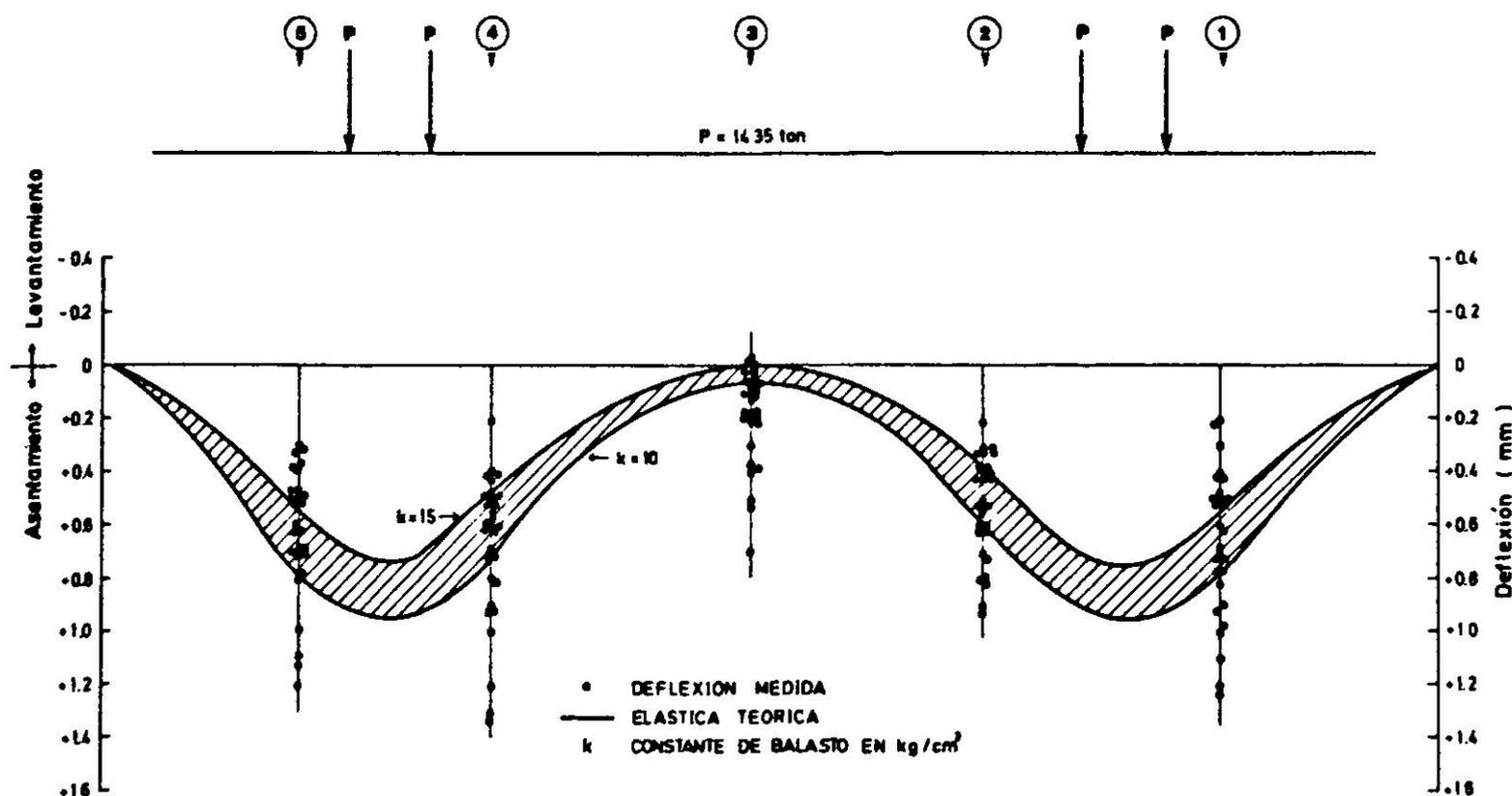


Fig. 7. Resumen de deflexiones medidas en el riel de tierra y elásticas teóricas para vigas de 0.90 x 0.40 m de sección.

El comportamiento observado no puede sino atribuirse, por una parte, a la capacidad de transmisión de corte en las grietas transversales, no obstante las aberturas de 0.3 - 0.4 mm medidas en varias de ellas. Este resultado confirma observaciones similares hechas en pavimentos de hormigón agrietados⁴. El otro efecto que es necesario considerar consiste en la capacidad del suelo de apoyo para transmitir corte, situación que no es tomada en cuenta en el modelo utilizado en la determinación de las elásticas teóricas⁵. Dicho modelo supone un apoyo sobre resortes independientes (hipótesis de Winkler), en lugar de consi-

derar resortes acoplados que darían origen a mayores asentamientos del punto de medición 3 (efecto de arrastre a través del suelo). Esto queda ilustrado por los resultados de la Fig. 8 que corresponden a elásticas en una losa de hormigón apoyada sobre resortes independientes y resortes acoplados entre sí⁶.

De acuerdo con lo expuesto en los párrafos precedentes, resulta evidente que el análisis teórico, para reflejar en forma más representativa tanto las condiciones de agrietamiento en la viga como el apoyo sobre un medio continuo, requiere plantear y resolver un modelo bastante complicado. Para efectos de resolver el problema de ingeniería planteado, el comportamiento de la viga sometida a las mayores cargas inducidas por las nuevas grúas fué tratado con la clásica teoría de vigas apoyadas sobre un medio winkleriano. Para tal efecto se recomendó considerar una viga de sección igual a 0.90 x 0.40 m apoyada sobre una cama de resortes con una constante de balasto comprendida entre 10 y 15 kg/cm³, situación que queda avalada por la relativa buena concordancia de los resultados expuestos en la Fig. 7. En todo caso, cabe recalcar que esos valores de constante de balasto corresponden a un suelo ya estabilizado por la

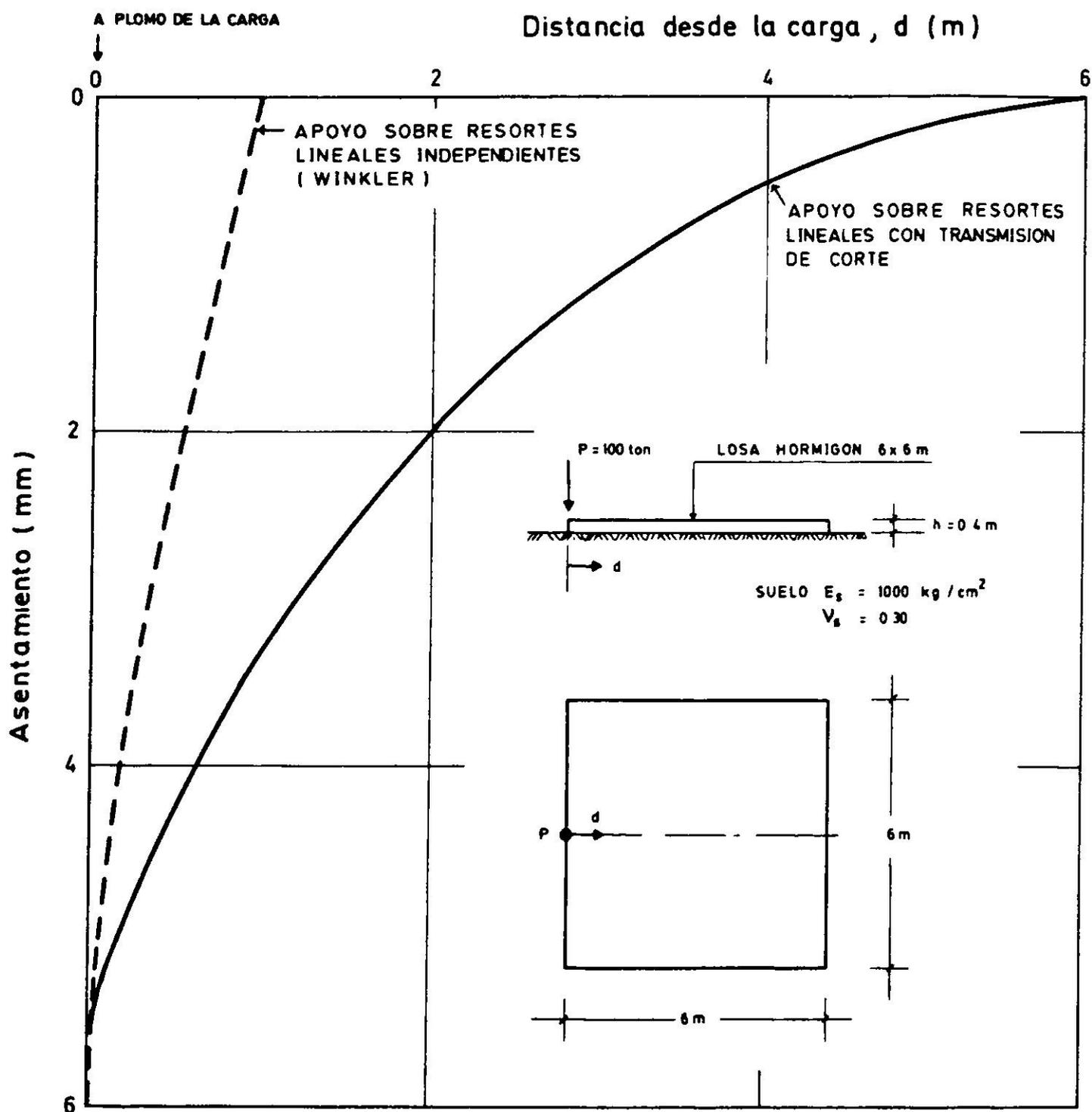


Fig. 8. Elástica en el eje de simetría de una losa flexible con carga puntual (Ref. 6).

acción de muchas repeticiones de la carga y, por lo tanto, representaría más bien un *balasto cíclico* del suelo.

CONCLUSIONES

1. Las deformaciones máximas del riel de tierra producidas por la carga de la grúa resultaron, en general, inferiores a 1 mm, salvo casos aislados de poca significación. Lo anterior indica una muy baja compresibilidad del suelo de apoyo, aunque a este respecto debe reconocerse que las deformaciones medidas sólo reflejan el comportamiento del suelo bajo carga cíclica, debiendo esperarse deformaciones adicionales no recuperables por causa de la mayor sollicitación *virgen* impuesta por las nuevas grúas trabajando al máximo de su capacidad.
2. La forma de las elásticas del riel de tierra medidas en cada una de las 29 posiciones de grúa demuestran que el sistema riel-viga de hormigón se comporta efectivamente como un conjunto solidario, asimilable a una viga continua apoyada sobre un medio winkleriano, a pesar de los sistemáticos agrietamientos transversales observados. Este comportamiento se ha explicado por el hecho de que las superficies de las grietas, siendo irregulares, proveen una efectiva capacidad de transmitir esfuerzos de corte por simple trabazón mecánica. En este caso la rigidez real de la viga de hormigón resulta incluso algo mayor que la que es posible calcular sin considerar agrietamientos, lo cual indica que existe un efecto rigidizante adicional debido a la capacidad del suelo para transmitir corte. Todo lo anterior hace recomendable desarrollar modelos teóricos más elaborados que contemplen los efectos mencionados a fin de evaluar su importancia relativa.
3. Con respecto a las diferencias de trocha y desalineamientos verticales y horizontales de los rieles en vacío detectados en su verdadera magnitud por las mediciones realizadas, se concluyó que ellos no serían atribuibles a movimientos irregulares del relleno de fundación, sino que se trataría más bien de defectos asociados al montaje original de los rieles.
4. Habiéndose realizado pruebas de carga a escala natural, con una sollicitación cercana al límite de capacidad de una de las grúas APPELVAGE, el sistema riel-fundación-relleno mostró ser altamente satisfactorio en cuanto a deformaciones. En vista de ello se concluyó que el sistema sería también adecuado para recibir las grúas MACOSA sin transformaciones sustanciales.

Incidentalmente cabe señalar que por efecto de estos resultados se procedió a instalar las grúas de mayor capacidad sobre los mismos rieles, efectuando solamente correcciones menores para mejorar los alineamientos e irregularidades de forma. Después de casi 2 años de opera-

ción de las nuevas grúas, el sistema riel fundación se ha comportado muy satisfactoriamente.

5. La precisión lograda en las nivelaciones, estimada del orden de ± 0.2 mm, permitió apreciar las pequeñas deformaciones verticales asociadas a la prueba, que de otra manera habrían pasado inadvertidas. Por otro lado, la concepción misma de las pruebas a escala natural obviaron el difícil problema del muestreo y ensayos de laboratorio tradicionales, con la consecuente complejidad de su interpretación.

Finalmente, el elevado número de pruebas realizadas constituyen una buena muestra estadística, reforzando la validez de las conclusiones anotadas.

AGRADECIMIENTOS

A la Empresa Portuaria de Chile por la oportunidad otorgada a los autores de realizar estos trabajos y por la autorización dada para la publicación de sus resultados.

A los geomensores señores Luis Hinojosa y Luis Garfias del Departamento de Geodesia, de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, de la Universidad de Chile, quienes tuvieron participación activa en terreno.

BIBLIOGRAFIA

1. OMEGA, INGENIERIA DE PROYECTOS. *Estudio para determinar las presiones ejercidas sobre el terreno por grúas Applevage y grúas Macosa*. Santiago, agosto 1978.
2. IDIEM. *Certificado de Ensayo N° 146600*. Informe sobre pruebas de carga a escala natural en rieles de grúas del Malecón de Costa, Puerto de Antofagasta, Santiago, julio 1979.
3. HETENYI, M. *Beams on elastic foundation*. The University of Michigan Press, 1946.
4. ROCHA, M. *Comunicación personal relativa a experiencias de la Portland Cement Association PCA, USA*.
5. SCOTT, R. *Foundation Analysis*. Ed. Prentice Hall, 1981.
6. OBILINOVIC, H. *Influencia del suelo de apoyo en el diseño de losas de fundación*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magister en Mecánica de Suelos. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1976.

NATURAL SCALE LOAD TESTS ON CRANE RAILS**SUMMARY**

A presentation is made of natural scale load tests on crane rails of the Port of Antofagasta, Chile, which are founded on a granular fill with rock blocks and boulders through a beam of unreinforced concrete. Deflections were measured at preselected points on the rails, first unloaded and then loaded by a crane at its maximum load capacity. Results show that the system behaves effectively as a beam on elastic foundation, whose rigidities (soil and beam) are inferred. The effects of sistematic transverse cracking along the concrete beam were also analysed, reaching the conclusion that rupture surfaces, being irregular, would maintain the shear stress transmission across the cracks by simple mechanical interlocking.