

ENSAYO DE FRICCIÓN DE LA INTERFASE BASE — PAQUETE ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO POSTESADO

Alejo O. Sfriso¹
Alejandro D. Verri²

Verri & Sfriso. Rivadavia 755 2° 10° - C1002AAF – Buenos Aires – Argentina.

1: mailto: asfriso@members.asce.org

2: mailto: averri@members.asce.org

RESUMEN

La superficie principal de maniobra de la terminal logística M'Bopicua es un pavimento postesado de 24.000 m² de superficie a la intemperie con alto tráfico de stackers y grúas, y con paños de hasta 70 metros de largo sin juntas. En este tipo de estructuras, el postesado tiene pérdidas provocadas por fricción entre el paquete estructural y su base durante y después del tesado. Para minimizarlas, se eligió una interfase de fricción reducida compuesta por 3 a 5 mm de arena del Río Uruguay y un doble film de polietileno. Para esta interfase la bibliografía recomienda un coeficiente de fricción en el rango 0.60 – 0.80 si es que no se ejecutan ensayos especiales. Si se usa estos coeficientes con tensiones de postesado del orden de 2.5 MPa y paños de 70 metros, las pérdidas por fricción son del orden del 20% de la carga inicial, lo que tiene un gran impacto económico. Esto motivó a los proyectistas a realizar un ensayo de fricción especialmente preparado para verificar el funcionamiento de la interfase elegida en el diseño estructural. Se diseñó y construyó un dispositivo que permitió medir el coeficiente de fricción *in situ* y con las condiciones de la obra real. El coeficiente medido fue de 0.25, o sea el 40% del valor mínimo recomendado en la bibliografía, lo que permitió una gran economía de materiales y cable, y una importante simplificación en el diseño del pavimento y sus juntas.

PALABRAS CLAVE: pavimento postesado, ensayo de fricción, coeficiente de fricción.

ABSTRACT

The operation yard of Terminal Logística M'Bopicua is a 24.000 m² unprotected, post-tensioned concrete pavement, heavily loaded by stackers and cranes, with spans up to 70 meters between joints. In this kind of structures, the post-tensioning stresses have losses governed by friction between the structural plate and the pavement base, developed during and after stressing. To put these losses to a minimum, the engineers chose a friction reduced interface made by 3 – 5 mm of Río Uruguay sand and two sheets of polyethylene film. Friction coefficients recommended for this interfaces range 0.60 – 0.80, if no special testing is performed. These coefficients, along with post tensioning stresses of 2.5 MPa and spans of 70 m, produce friction losses around 20% of the initial tension load, with economic impact. This decided the project engineers to perform a friction test specifically devised to verify the behavior of the interface chosen in the structural design. A testing device was designed and built, and the friction coefficient was measured *in situ* with prevailing field conditions. The measured value was 0.25, around 40% of the minimum coefficient recommended in the bibliography. This allowed for important savings in materials and cable, and for a simplified design of the pavement and its joints.

KEYWORDS: post-tensioned pavement, friction test, friction coefficient.

INTRODUCCIÓN

Al norte de la localidad uruguaya de Fray Bentos, sobre el Río Uruguay, se construyó la terminal logística M' Bopicua, consistente en un muelle, una plataforma de operación y estiba y algunas instalaciones para el procesamiento de chips de madera. La superficie principal de maniobra es un pavimento postesado de 24.000 m² a la intemperie con alto tráfico de stackers de cien toneladas por eje y grúas de doscientas toneladas por eje, y con paños de hasta 70 metros de largo sin juntas. La contratista principal de la obra fue el consorcio CPC – CIMARG, la contratista local fue Constructora Santa María, mientras que el subcontratista de postesado fue VSL de Argentina. El proyecto fue ejecutado por nuestro estudio junto con el estudio de Larrague, Galladini y Asociados e ingenieros de la contratista y supervisado por el Ing. Zorrilla por parte del comitente.

Entre otras tareas, nuestro estudio participó en la determinación de las cargas no operativas (contracción de fraguado y endurecimiento, fluencia lenta, efectos climáticos y de migración de humedad), el cálculo de la cantidad de postesado requerida y el diseño estructural del paquete. En la figura 1 se muestra una vista de la obra durante el hormigonado del pavimento.



Figura 1: Vista de uno de los paños de pavimento postesado durante su hormigonado.

El criterio de diseño de un pavimento postesado es distinto al de un pavimento convencional (Medina 1997, AAF 1988). La incorporación de una tensión de compresión en el pavimento cambia el modo de falla del panel, que pasa de una fisura radial en la cara inferior a una línea circular en la cara superior. La carga de falla para esta forma de rotura es más del doble de aquella que produce la primera fisura de tracción en la superficie, lo que permite usar coeficientes de seguridad cercanos a uno respecto a la tensión admisible de tracción. La influencia del coeficiente de fricción en el diseño de pavimentos postesados puede verse en la fórmula básica (Packard 1973, 1993):

$$\sigma_t + \sigma_p - \sigma_f(\delta) \geq \sigma_{\Delta t} + \sigma_{\Delta h} + \sigma_L \quad (1)$$

donde σ_t es la tensión máxima de tracción del hormigón, σ_p es la tensión de compresión debida al postesado sin pérdidas, $\sigma_f(\delta)$ es la tensión perdida por fricción con la subrasante, $\sigma_{\Delta t}$ es la tensión debida a cambios de temperatura entre la cara superior y la subrasante del pavimento (*curling*) y $\sigma_{\Delta h}$ es la tensión debida a la humedad diferencial entre caras (*warping*). σ_L es la tensión debida a las cargas operativas.

Esta circunstancia hace que las cargas no operativas, que dependen fundamentalmente de la fricción que se desarrolla entre el paquete estructural y la base durante y después de las tareas de postesado, dominen el diseño. Para tensiones de postesado del orden de 2.5 MPa, las pérdidas por fricción calculadas en el centro de la placa son del orden del 20% en las placas de 70 m de longitud, lo que muestra la importancia económica del conocimiento del comportamiento de la interfase paquete – base.

Desde hace mucho tiempo se sabe que en los pavimentos de hormigón convencional las interfases con fricción reducida inducen menores tensiones de tracción que las interfases no tratadas. Sin embargo, debido a que estas tensiones son muy pequeñas y su reducción no tiene gran impacto económico, las características de las interfases de fricción reducida no han sido estudiadas sino hasta el advenimiento de los pavimentos postesados. En este tipo de pavimentos, son habituales tramos sin juntas de hasta 150 m. El límite de la experiencia lo constituye el aeropuerto de Orly, Paris, con tramos de 400 m de longitud.

Existen numerosos tipos de interfase de fricción reducida, que incluyen: interposición de cama de arena de diferentes espesores; interposición de una o más láminas de polietileno; uso de emulsiones asfálticas, etcétera. Todas ellas buscan mantener el coeficiente de fricción en un valor reducido y predecible. Los coeficientes de fricción mencionados en la bibliografía varían desde 0.20 hasta 1.50 para pavimentos construidos sobre sub-bases granulares, aunque para propósitos de diseño se recomienda utilizar valores de 0.60 a 0.80. Si se usan dos capas de polietileno, el coeficiente de fricción teórico es menor a 0.20. No obstante se recomienda que no se utilicen valores menores a 0.60, debido fundamentalmente a la falta de ensayos *in situ* (Timms 1964, ACI 1992 y 1995).

En el caso del pavimento de M^oBopicuá se eligió una interfase compuesta por 3 a 5 mm de arena del Río Uruguay y un doble film de polietileno. Esta base combina las ventajas de ambos elementos reductores de fricción: una fricción material más reducida y la capacidad de la arena de rellenar depresiones de la base y uniformizar la superficie superior, en contacto con el hormigón

A pesar de esto, las recomendaciones de diseño de la bibliografía mantienen el coeficiente de fricción en el rango 0.60 – 0.80. Esto motivó a los proyectistas a realizar un ensayo de fricción especialmente preparado para verificar el funcionamiento de la interfase elegida en el diseño estructural.

INTERFASE BASE – PAQUETE Y DISEÑO DEL ENSAYO DE FRICCIÓN

Si se acepta que la relación tensión – deformación de la interfase es coulombiana, valen las expresiones

$$\tau < s \rightarrow \tau = k_h \cdot \zeta \quad (2)$$

$$\tau = s \rightarrow \tau = \sigma \cdot \tan[\delta] \quad (3)$$

donde τ es la tensión de corte en la interfase, k_h es el módulo de reacción de la subrasante por fricción, ζ es el desplazamiento horizontal, s es la resistencia al corte, σ es la tensión normal y δ es el ángulo de fricción entre el paquete estructural y la base.

Se estimó que un ensayo representativo debía abarcar al menos dos metros cuadrados de superficie, ejecutada sobre la base real y con las mismas técnicas que se usarían para la construcción del pavimento.

Se dispuso la construcción del dispositivo que se muestra en la figura 2, compuesto por un marco cerrado de perfiles de acero que permite el ensayo cíclico de un panel de 1.50 m de lado y de 25 cm de espesor. La carga se aplicó con un gato de tornillo accionado manualmente y se midió con dos aros dinamométricos de 5 KN y de 50 KN de capacidad máxima, clase superior a 0.50. Los desplazamientos se midieron con dos flexímetros de capacidad 20 mm x 0.01 mm, con fundación independiente del panel, del marco y de los puntos fijos.

En la figura 3 se observa el dispositivo construido, mientras que en la figura 4 se observa la disposición inicial del gato mecánico utilizado.

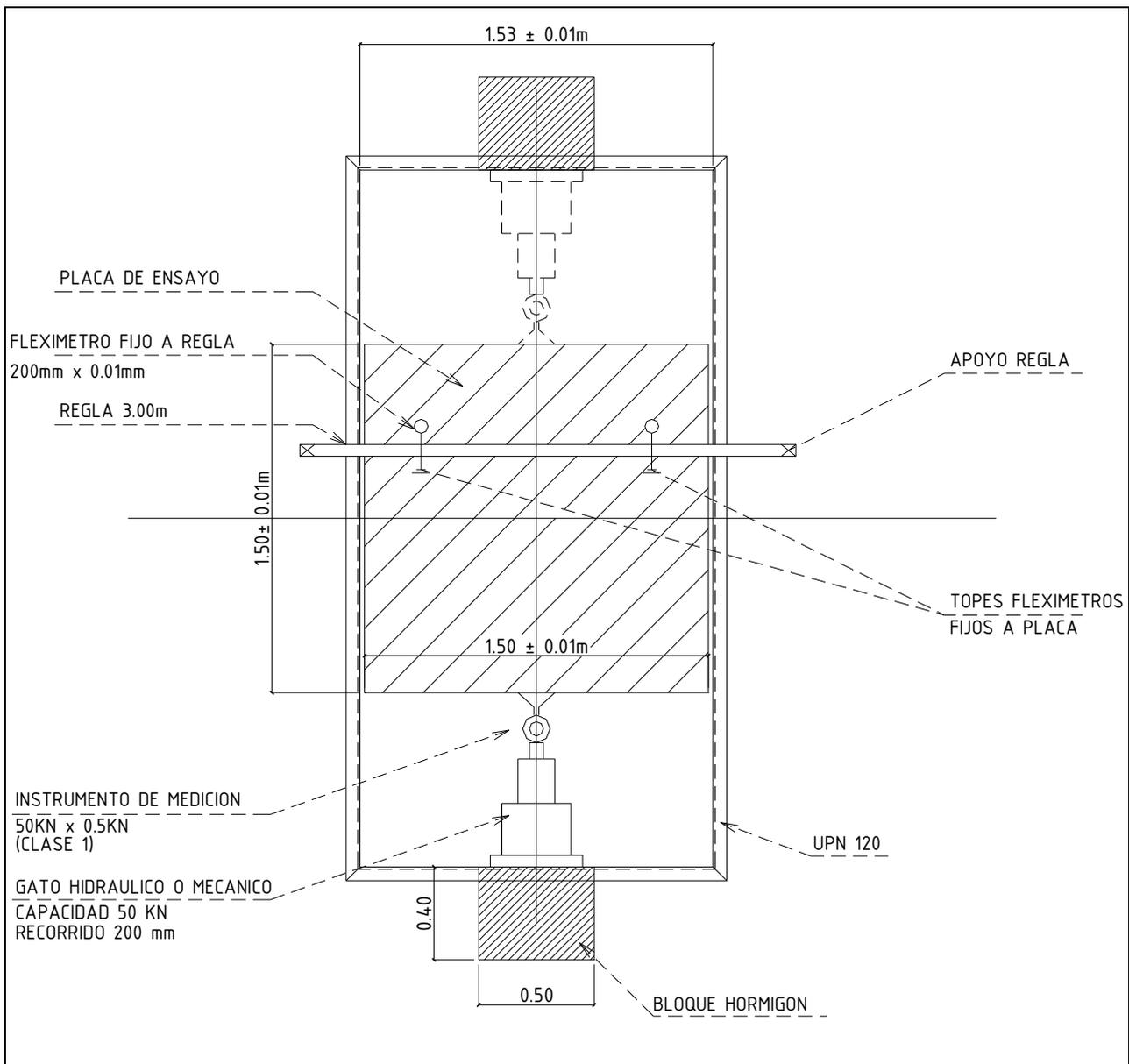


Figura 2: Dispositivo para el ensayo de fricción.



Figura 3: Vista del dispositivo completo para ensayo de fricción.

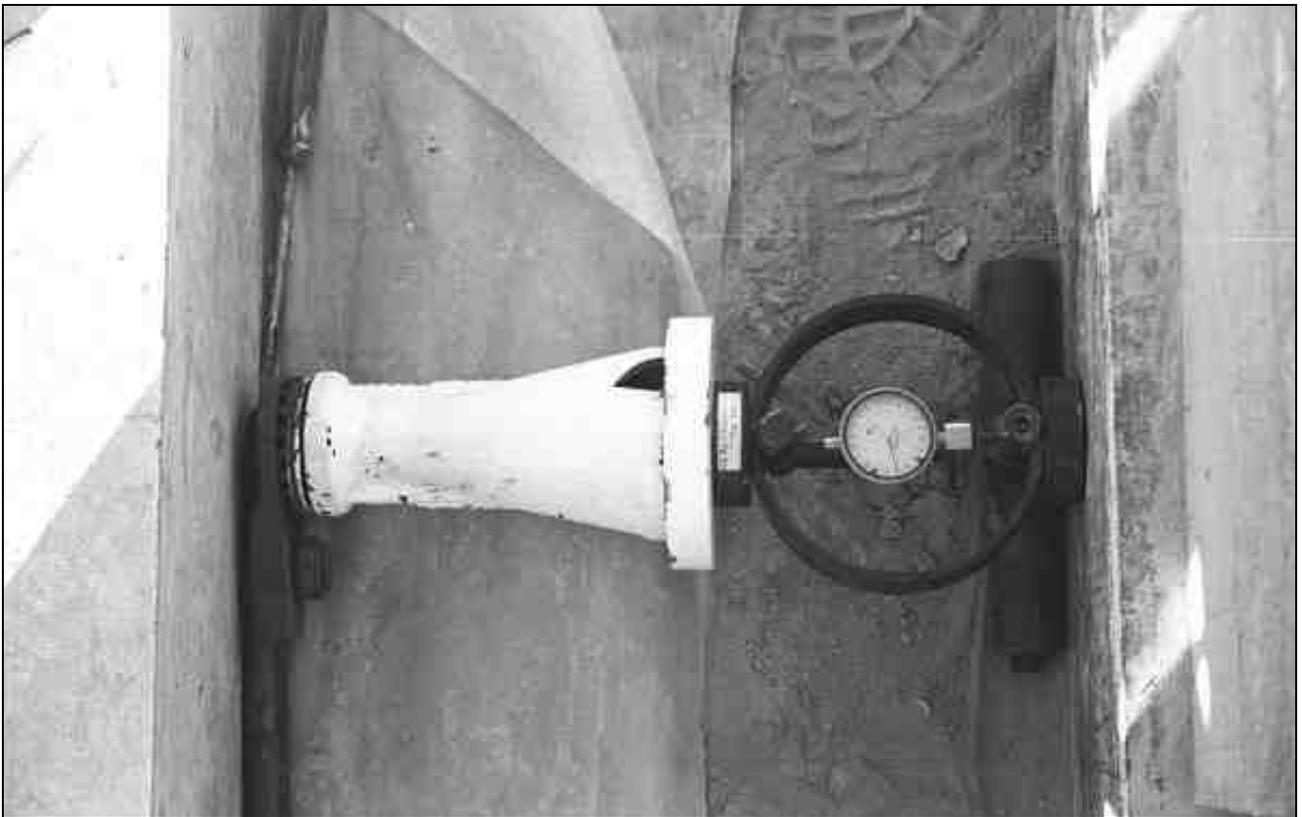


Figura 4: Detalle del gato mecánico que empuja el panel.

EJECUCIÓN Y RESULTADOS

Se cargó el panel a una velocidad de 1.0 – 1.5 KN/min hasta los 3.50 KN sin que se registraran desplazamientos. Entre 3.50 KN y 3.59 KN se produjo un desplazamiento de 0.02 mm y se interrumpió la aplicación de la carga. El desplazamiento aumentó hasta 0.30 mm en seis minutos, mientras la lectura en el aro bajaba hasta 3.35 KN. El trabajo fue efectuado por la recuperación elástica de la energía almacenada en el aro dinamométrico, el gato y su punto de apoyo. La carga se estabilizó en 3.35 KN con el cese de los desplazamientos observables. Luego se impuso un desplazamiento de 30 mm en un minuto, para lo que fue necesaria la aplicación de una carga de 4.74 KN.

Se descargó el panel hasta cero y se aplicó nuevamente el programa de carga en la otra dirección. La carga que reinició el desplazamiento fue de 3.53 KN. Suspendida la carga se produjo un desplazamiento total de 0.36 mm que se estabilizó cuando la carga cayó a 3.36 KN.

Luego de terminado el segundo ciclo de carga se removió el panel mediante una grúa y se lo pesó. Su peso fue de 13.76 KN. La observación de la superficie de deslizamiento no produjo información interesante, puesto que el proceso de remoción del panel destruyó toda la evidencia producida por el ensayo.

El coeficiente de fricción máximo δ_p y el residual δ_r se calcularon con las expresiones (2) y resultaron

$$\begin{aligned}\tan[\delta_p] &= \frac{T_{ini}}{W} = \frac{3.59 \text{ KN}}{13.76 \text{ KN}} = 0.260 \\ \tan[\delta_r] &= \frac{T_{res}}{W} = \frac{3.35 \text{ KN}}{13.76 \text{ KN}} = 0.243\end{aligned}\tag{2}$$

donde T_{ini} es la carga que produjo el inicio del deslizamiento, T_{res} es la carga de cese de desplazamiento y W es el peso propio del panel.

CONCLUSIONES

El coeficiente de fricción de la interfase elegida es del orden de 0.25, o sea el 40% del valor mínimo recomendado en la bibliografía. Sin embargo, el ensayo ejecutado no captó el incremento de fricción producido por la mayor rugosidad de la cancha real comparada con la de prueba, debido a las ondulaciones típicas de un movimiento de suelos de gran escala y a que en la obra los operarios caminan sobre el polietileno para instalar los cables, deformando la capa de arena. +

Teniendo en cuenta estas circunstancias, se recomendó la utilización de un coeficiente de fricción mínimo de 0.30 cuando la fricción era desfavorable al diseño, y de 0.24, cuando la fricción era favorable al diseño. También se hicieron verificaciones con un coeficiente de fricción de 0.50.

La fricción paquete – base es muy rígida. Los desplazamientos que producen la movilización total de la resistencia al corte son tan pequeños que no pudieron ser registrados con 0.01 mm de precisión. Efectuadas las verificaciones correspondientes, puede afirmarse que no tiene sentido utilizar un modelo elastoplástico de funcionamiento de la interfase paquete – base, sino que basta con el modelo rígido – plástico recomendado por la bibliografía.

Los desplazamientos iniciales producidos por el postesado real superaron los tres milímetros en los paños largos. Luego de una semana de aplicado el tesado total, se registraron desplazamientos superiores a los cinco milímetros, como puede observarse en la figura 5. Estos desplazamientos son más de 100 veces mayores que los necesarios para alcanzar la fricción residual.

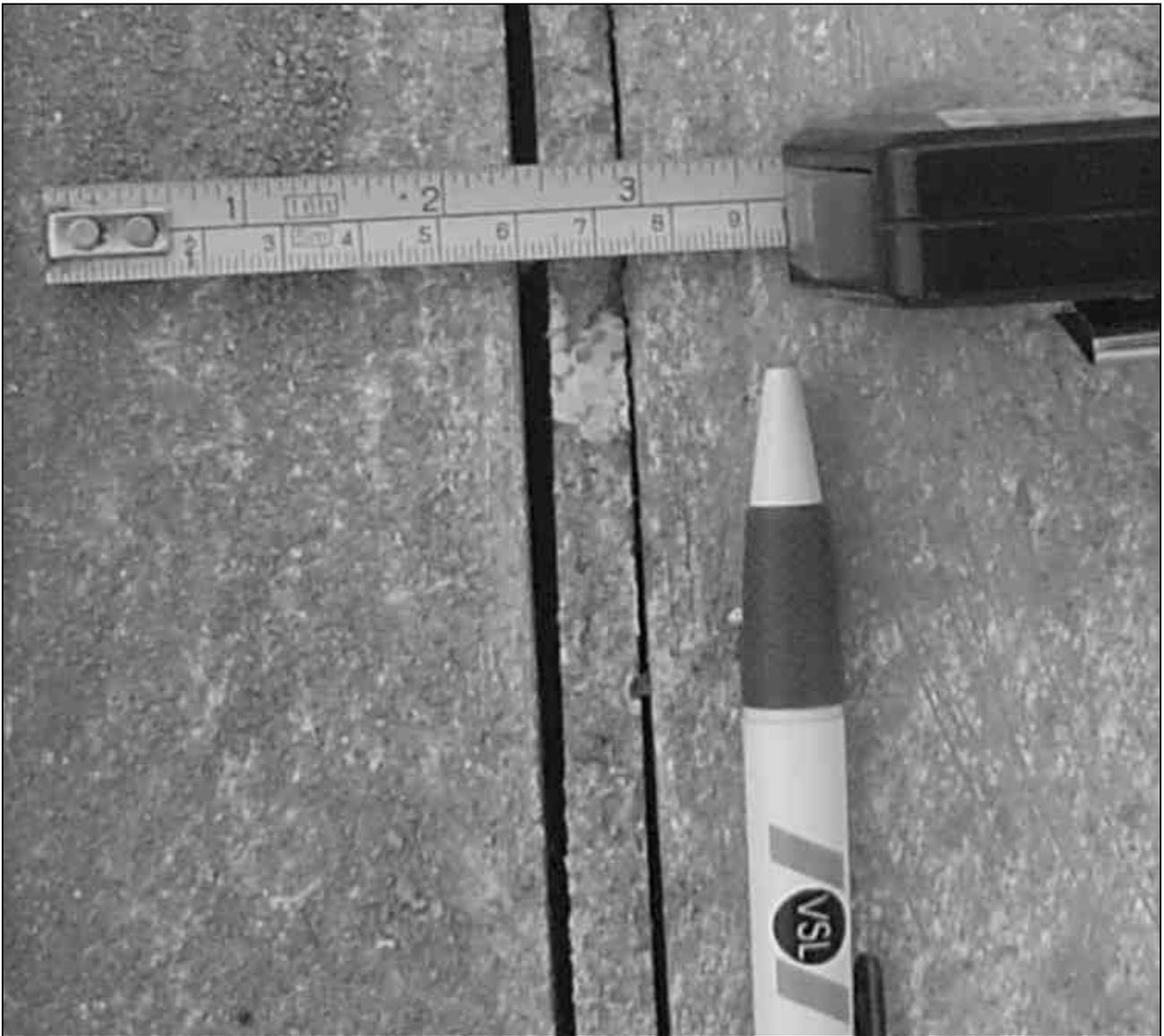


Figura 5: Apertura de una junta observada una semana después del tesado de uno de los paneles.

TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- ACI, 1995. ACI 224-3R: Joints In Concrete Construction. American Concrete Institute, USA.
- ACI, 1992. ACI-209R: Prediction of creep, shrinkage and temperature effects in concrete structures. American Concrete Institute, USA.
- AAF, 1988. Rigid Pavement Design For Airfields. Elastic Layered Method. Army Air Force, USA.
- MEDINA, J. 1997. Mecânica dos pavimentos. Ed. Universidad Federal Do Rio de Janeiro, 467 p.
- PACKARD, R. 1973. Design of Concrete Airport Pavement. Portland Cement Association, USA.
- PACKARD, R. 1993. Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements. Portland Cement Association, USA.
- TIMMS, A. 1964. Evaluating Subgrade Friction-Reducing Mediums for Rigid Pavements. Bull 60, Highway Research Board.