

# APARATO PARA MEDIR LA APTITUD DE BOMBEO DEL HORMIGON

Ernesto GOMEZ G.\*  
Charles RENERE V.\*\*

## RESUMEN

*Se describe un aparato de laboratorio para medir la aptitud del hormigón para ser bombeado, consistente en un tubo que puede hacerse deslizar mientras el hormigón sometido a presión permanece inmóvil en su interior y que permite medir la resistencia al deslizamiento.*

*Se comparan los resultados obtenidos con los que se podrían deducir de otros criterios de análisis de aptitud de bombeo y se concluye que el aparato da indicaciones cualitativas correctas y se espera que con algunos ajustes mecánicos quede a punto de servir como instrumento de laboratorio rápido y práctico.*

## INTRODUCCION

El transporte del hormigón por tuberías impulsado por bomba es muy utilizado hoy día como un medio de colocación de este material. En algunas aplicaciones tiene ventajas netas con respecto a los demás procedimientos de traslado usados y conocidos. Su alcance se ha ido extendiendo desde un modesto comienzo de unos treinta metros en horizontal, hasta más de trecientos metros en altura<sup>1</sup>.

Los primeros intentos de bombear hormigón se remontan a comienzos de siglo: ya en 1913, según lo señala R. Weber<sup>2</sup>, se patentó la primera bomba de

---

\* Investigador de IDIEM  
\*\* Ingeniero Civil

hormigón. Pero recién en 1929 se obtuvieron algunos resultados de interés práctico. Hacia adelante, hasta la actualidad, la técnica ha ido mejorando, en la medida en que se desarrollaban bombas más perfeccionadas. Este perfeccionamiento ha sido más rápido que el avance en el conocimiento teórico del fenómeno mismo de bombeo, que se descuidó frente a los éxitos prácticos obtenidos. Los primeros estudios experimentales para medir la presión en la tubería y para comprobar los límites de bombeo del hormigón, se hicieron a partir de 1937. Más tarde, a partir de 1950, se hicieron estudios sistemáticos de laboratorio por Joisel, Ede y Aleksejev, separadamente, para determinar las influencias de las características del hormigón sobre la presión de transporte.

Joisel<sup>3</sup> formuló las condiciones básicas que se requieren para que un hormigón se pueda bombear. Ellas consisten, en principio, en disminuir la fricción entre el hormigón y la pared del tubo. Esto se consigue sólo si existe una película de agua entre ambos.

Hay una primera condición, entonces, que es que se forme la película y para lograrla, el hormigón debe contener una cantidad de agua superior a una cantidad crítica. Si no alcanza a tenerla se produce contacto de los granos del árido con la pared de la tubería y fricción del tipo Coulomb entre ambos, o sea, proporcional a la presión normal, dando lugar a fuerzas de resistencia que crecen exponencialmente con la longitud del tubo y que bloquean la bomba.

La segunda condición es que el agua no escurra con mucha facilidad a través del hormigón, porque, si así sucediera, aunque se formara la película en el primer momento, el hormigón perdería agua muy rápidamente y pasaría en un corto trayecto a la condición de bloqueo.

En resumen, el hormigón bombeable debe contener más agua que la necesaria para llenar todos los huecos existentes entre las partículas sólidas y debe ser capaz de retenerla a altas presiones. Esta última condición se facilita con un contenido apropiado de finos.

Ede<sup>4</sup> hizo una serie de experiencias, en que midió la fricción que se producía entre la pared del tubo y el hormigón para condiciones varias de mezclas y de presión. Sobre la base de esas medidas confirmó las conclusiones de Joisel y les dió un contenido cuantitativo más preciso. Reiteró en sus conclusiones que los materiales no saturados, cuyo contenido de agua no llena los huecos entre las partículas, transmiten la presión por contacto entre las partículas y su resistencia al desplazamiento aumenta exponencialmente con la longitud del tubo. La saturación con pasta de agua cemento transforma la resistencia a una de tipo lineal, independiente de la presión, pero que aumenta con la velocidad de bombeo. El límite de la razón agua-cemento para alcanzar la saturación lo situó encima de 0.5.

Una vez bien reconocidos y establecidos los fundamentos del fenómeno de bombeo, tales como quedaron expresados en los trabajos citados y otros de la misma época, quedaba por encontrar procedimientos de laboratorio rápidos y prácticos para medir la aptitud de bombeo del hormigón. A esta

tarea se dedicaron muchos esfuerzos y citaremos dos trabajos que, creemos, se acercaron a los objetivos buscados.

R.D. Browne y P.B. Bamforth<sup>5</sup> concibieron la idea de medir el desalojo o escurrimiento de agua a través del hormigón fresco sometido a presión, con el cual está relacionado, según se ha expuesto, la aptitud de bombeo. Construyeron un aparato formado por un recipiente, donde se coloca el hormigón recién preparado, en cuyo fondo hay una malla tupida que retiene el material fino y una llave de salida del agua. En la parte superior se puede aplicar presión por medio de un pistón bien ajustado a las paredes del recipiente. Una vez aplicada y mantenida una determinada presión, se abre la llave del fondo y se mide el agua que sale a intervalos regulares de tiempo.

Después de hacer los ensayos correspondientes, comprobaron, tal como se había supuesto, que el desalojo de agua tenía diferentes características para diferentes hormigones: había algunos en que era muy rápido y otros en que tomaba bastante tiempo. Ellos eligieron como índice de aptitud para el bombeo la diferencia entre el agua total desalojada y la cantidad de agua que pasa en los primeros 10 segundos: cuanto mayor sea esa diferencia, mayor es esa aptitud, probablemente con algún tope superior. Este criterio es consecuente con las ideas básicas enunciadas anteriormente, a saber: formación de una película de agua junto con escurrimiento lento del agua.

Es evidente que ninguna medición puede representar tan bien la aptitud de un hormigón para ser bombeado como someterlo a bombeo y notar cómo se comporta. Sin embargo, esta operación no es susceptible, en general, de convertirse en prueba de laboratorio, pero se puede pensar en equipos adecuados que resuelvan, aunque sea parcialmente, el problema. Morinaga<sup>6</sup> montó uno de estos equipos, que podría calificarse de planta piloto a escala de laboratorio. El hormigón contenido en un recipiente se impulsaba por aire a presión a través de un tubo, pudiendo variarse la velocidad de escurrimiento variando la presión del aire. Con instrumentos especiales se medía la fuerza de fricción, la presión de aire, la presión lateral en el tubo y la descarga de hormigón en función del tiempo. Es decir, se obtenían todos los datos necesarios para estudiar el fenómeno de bombeo. Además de la disposición experimental anterior, usó otra en que la impulsión se producía por bomba.

Morinaga obtuvo un conjunto de resultados sistemáticos que le sirvieron de base para deducir fórmulas de pérdida de presión para tubos rectos, codos y tubos reductores de diámetro. Los factores que afectan esa pérdida de presión son muchos; entre ellos fueron considerados en la investigación el diámetro de la tubería, la dosificación del hormigón y el tipo de bomba.

El equipo experimental de Morinaga y otros similares que se han montado y hecho funcionar en diversos laboratorios son muy útiles para investigaciones y estudios de largo vuelo y duración pero, por requerir un montaje y operación bastante complicados y mucho despliegue de material, ya que equivalen a reproducir un equipo de bombeo a escala no muy reducida, no se prestan para pruebas

rápidas de laboratorio.

Por estas razones nos propusimos en este trabajo desarrollar un procedimiento de prueba que permitiera medir la aptitud de bombeo del hormigón en forma directa y además simple, en laboratorio, como etapa previa para estudiar mezclas de dosificaciones diversas.

## PROGRAMA EXPERIMENTAL

### Equipo

Para impulsar el hormigón a través de un tubo se requiere un equipo de bomba o de aire comprimido, ambos quedan fuera del ámbito de operación simple y apta para laboratorio que nos hemos trazado.

Debido a ello se pensó en una solución en que se desplazara el tubo y el hormigón se mantuviera fijo. Hay que aceptar que las fuerzas que se generan son las mismas que en el caso opuesto, a igualdad de condiciones, ya que el movimiento es relativo.

Entonces, el equipo básico se concibió como un tubo del diámetro requerido, en el cual se colocará hormigón ocupando una parte de él. Se necesita poder variar la presión aplicada al hormigón, dentro de límites amplios, para simular la operación de bombeo. Esto se puede obtener con dos pistones interiores bien ajustados, uno en cada extremo del trozo de hormigón, presionado uno de ellos por medio de un gato hidráulico apoyado en un soporte fijo y el otro apoyado directamente en otro soporte opuesto al anterior.

Para el desplazamiento del tubo se ideó un sistema de tirantes ligados a uno de sus extremos por la parte exterior y empujados por otro gato hidráulico apoyado en el respaldo de uno de los soportes fijos anteriores.

Tanto el gato de presión como el de empuje tenían medidor de carga.

En la Fig. 1 se muestra un esquema del dispositivo usado y en la Fig. 2 una vista del aparato, tal como se montó en el laboratorio.

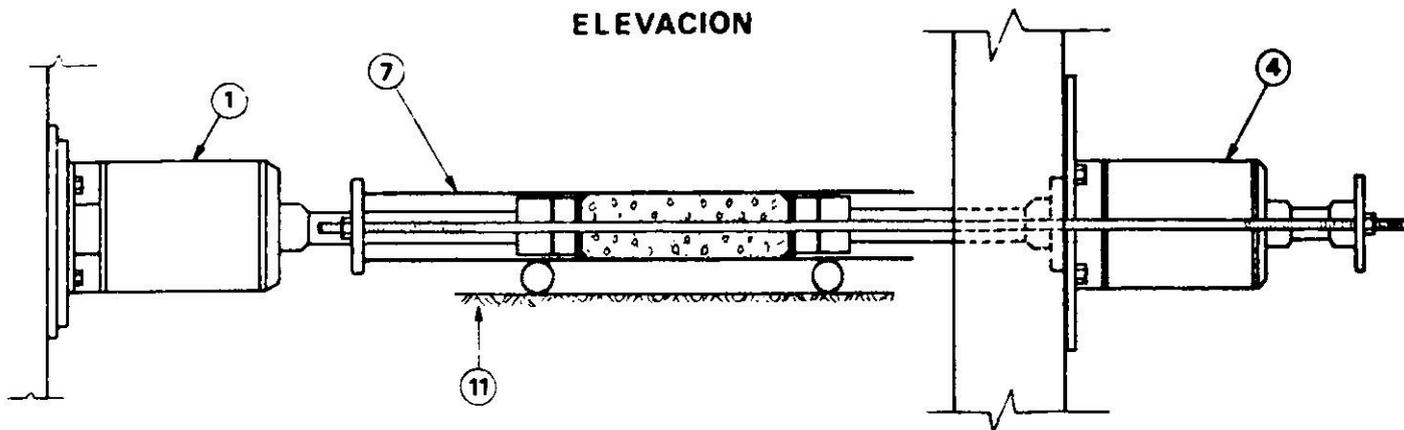
Para otras determinaciones complementarias o preparatorias se usaron equipos corrientes para la preparación de áridos y de hormigón, para medir asentamientos y para determinar el porcentaje de huecos de algunas de las mezclas. Además se construyó un equipo especial, basado en el modelo de Browne y Bamforth<sup>5</sup>, para medir el escurrimiento del agua a través del hormigón fresco sometido a presión. Paralelamente se usó el aparato de Tatersall<sup>7</sup> para verificar algunas características reológicas de los hormigones.

### Mezclas y ensayos

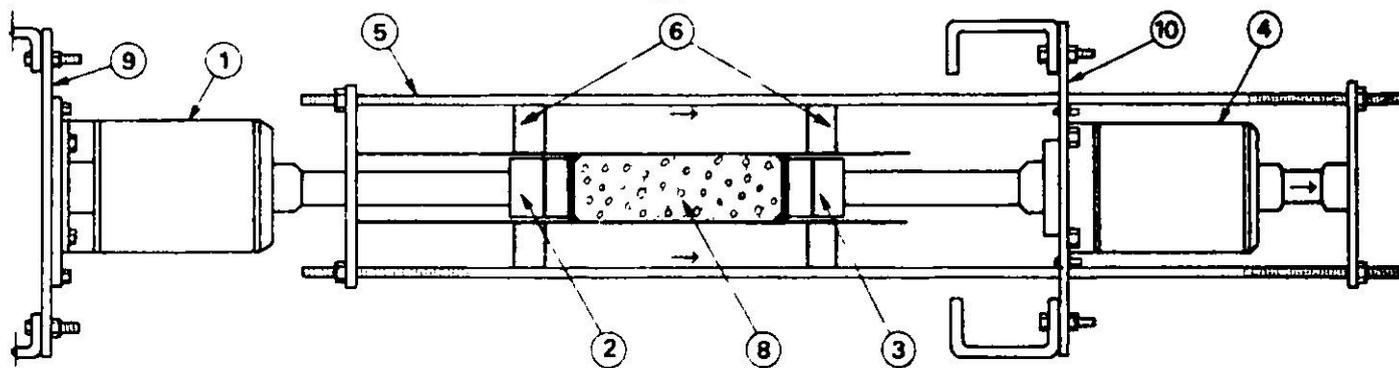
La idea básica era constatar el funcionamiento del equipo ideado. Se pensó, entonces, en preparar hormigones dentro de una amplia gama de dosificaciones. Según lo que se ha expuesto, el hormigón, para ser bombeable, debe ser compac-

to, o saturado, lo que significa que todos los huecos entre las partículas sólidas estén llenos de agua, o bien, que la pasta de cemento llene con exceso los huecos de los éridos. También se puede deducir de lo expuesto, aunque no tan directamente, que a medida que aumenta la dosis de cemento, dentro de la condición de saturación, puede aumentar mucho la resistencia al bombeo, porque el escurrimiento del agua a través del hormigón se hace más difícil y escaso.

ELEVACION



PLANTA



- |   |   |                                 |
|---|---|---------------------------------|
| 1. Gato hidráulico de compresión                          | 2, 3. Pistones de compresión                | 4. Gato hidráulico de impulsión |
| 5. Tirantes de impulsión                                  | 6. Polines de deslizamiento                 | 7. Tubo                         |
| 8. Hormigón   | 9. Apoyo del gato hidráulico de compresión. |                                 |
| 10. Apoyo del gato hidráulico de desplazamiento del tubo. | 11. Superficie de apoyo del tubo            |                                 |

Fig. 1. Croquis del equipo de medición de la fuerza de deslizamiento

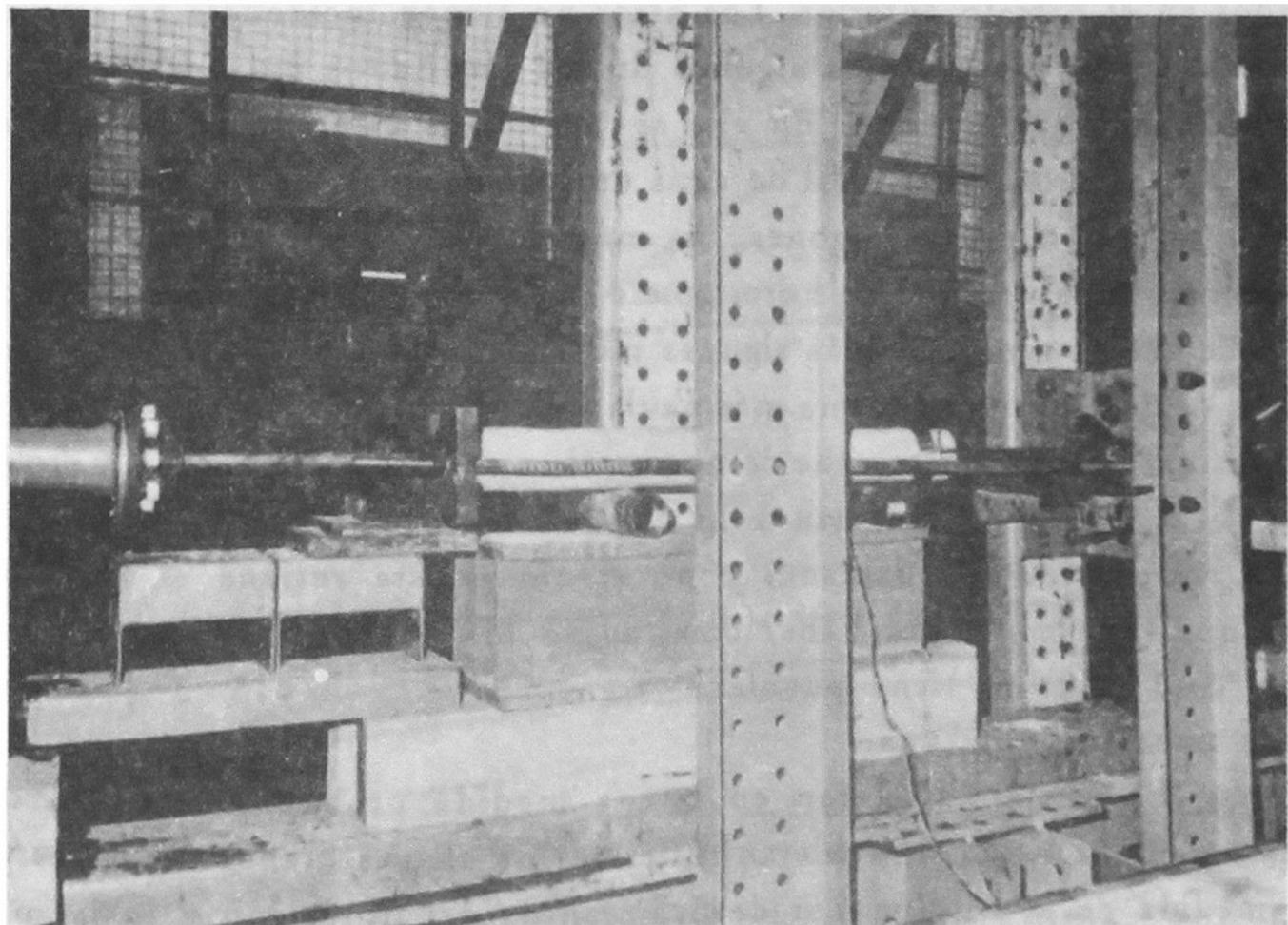


Fig. 2. Fotografía del equipo en su montaje

Dentro de este cuadro conceptual se hizo la elección de las mezclas. Se intentó preparar homígones con diferentes aptitudes de bombeo, desde fáciles hasta difíciles, para constatar si el equipo ideado los distinguía.

Se usó una cantidad fija de agua de 175 l por m<sup>3</sup> en todas las mezclas y dosis de cemento de 240, 287, 323, 359 y 395 kg por m<sup>3</sup> de hormigón. Se usaron, también, tres granulometrías distintas de áridos, por variación del porcentaje de arena. Por último, como los hormígones de bajo contenido de cemento, los dos primeros en nuestro caso, o no son saturados o apenas lo son, se les agregó puzolana para reducir su porcentaje de huecos y transformarlos en saturados; y como los hormígones ricos en cemento, los tres últimos en nuestro caso, son demasiado consistentes, se les agregó un aditivo plastificante para hacerlos más dóciles.

En total se prepararon 15 hormígones diferentes sin puzolana ni aditivo, ocho con aditivo y seis más con puzolana<sup>8</sup>.

A todos los hormígones se les determinó la resistencia a la compresión, en probetas cilíndricas, a 7 y 28 días. Todas las mezclas en estado fresco fueron sometidas al análisis de características reológicas en el aparato de Tatersall, a la determinación de pérdida del agua por la presión y a medida de la resistencia de fricción por deslizamiento en un tubo, simulando bombeo.

## RESULTADOS

Los resultados de los ensayos aparecen en un trabajo de Reneré<sup>8</sup>. Aquí nos interesa referirnos solamente a los dos últimos ensayos de hormígones frescos indicados en el párrafo anterior. Los otros no tienen incidencia en este análisis.

En la Fig. 3 presentamos algunos de los resultados del ensayo de escurrimiento de agua bajo presión. En ella se ven claras diferencias entre diferentes mezclas, tanto en cantidad total de agua entregada como en la pendiente inicial.

Hay un grupo de hormígones, los más ricos en cemento, que sueltan muy poca agua; a la inversa del de hormígones con poco contenido de cemento, que dejan salir mucha agua. Además algunas mezclas se desprenden del agua en corto tiempo y otras lo hacen en forma más paulatina.

A este último respecto cabe comparar el comportamiento de la mezcla \*4-2 con la 4-2, que se diferencian sólo en que la primera no tiene puzolana y la segunda tiene 2.1% de puzolana, y notar como ésta retiene el agua por más tiempo que la primera, por haber disminuido los huecos. Algo parecido sucede con la \*5-1, que no tiene puzolana, frente a las 5-2 y 5-3 que contienen 2.1% de puzolana cada una.

Estas diferencias, que eran en buena medida previsibles de acuerdo a lo expuesto con anterioridad, debieran reflejarse de alguna manera en los resultados de la medida de la fricción por deslizamientos del hormigón a lo largo de un tubo dados por el aparato que estamos poniendo a prueba.

Composición de las mezclas

	Cemento kg/m <sup>3</sup>	Puzolana (%)	Aditivo (%)	Arena (%)
1 - 2	395	0.0	0.5	42.0
1 - 3	395	0.0	0.5	35.0
2 - 1	359	0.0	0.5	50.5
3 - 1	323	0.0	0.3	50.4
*3 - 3	323	0.0	0.0	35.0
4 - 2	287	2.1	0.0	42.0
*4 - 2	287	0.0	0.0	42.0
*5 - 1	240	0.0	0.0	50.4
5 - 2	240	2.1	0.0	42.0
5 - 3	240	2.1	0.0	35.0

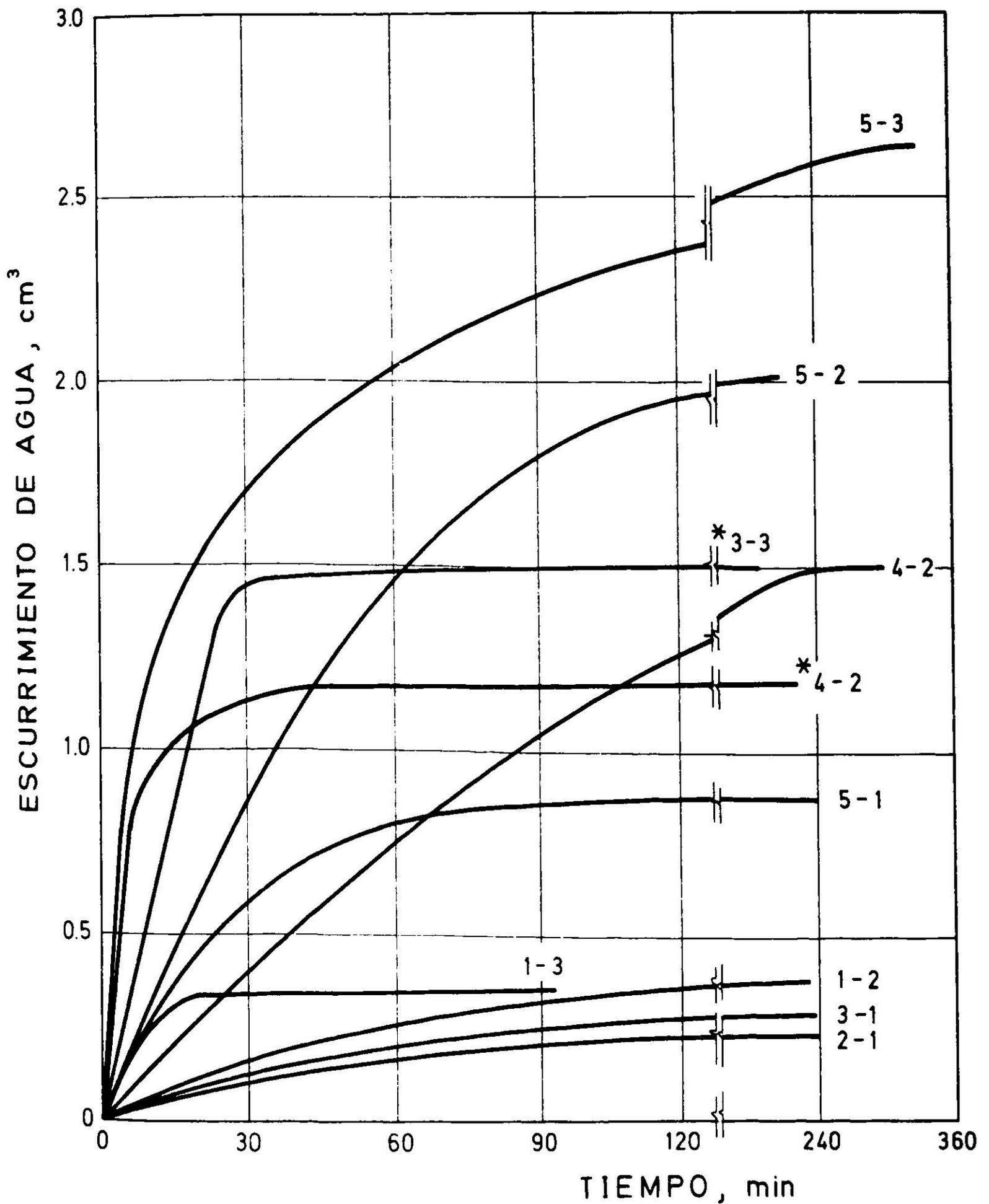


Fig. 3. Escurrimento de agua bajo presión.

Composición de las mezclas

	Cemento kg/m <sup>3</sup>	Puzolana (%)	Aditivo (%)	Arena (%)
1-2	395	0.0	0.5	42.0
1-3	395	0.0	0.5	35.0
2-1	359	0.0	0.5	50.5
2-2	359	0.0	0.5	42.0
*5-1	240	0.0	0.0	50.4
5-2	240	2.1	0.0	42.0
5-3	240	2.1	0.0	35.0

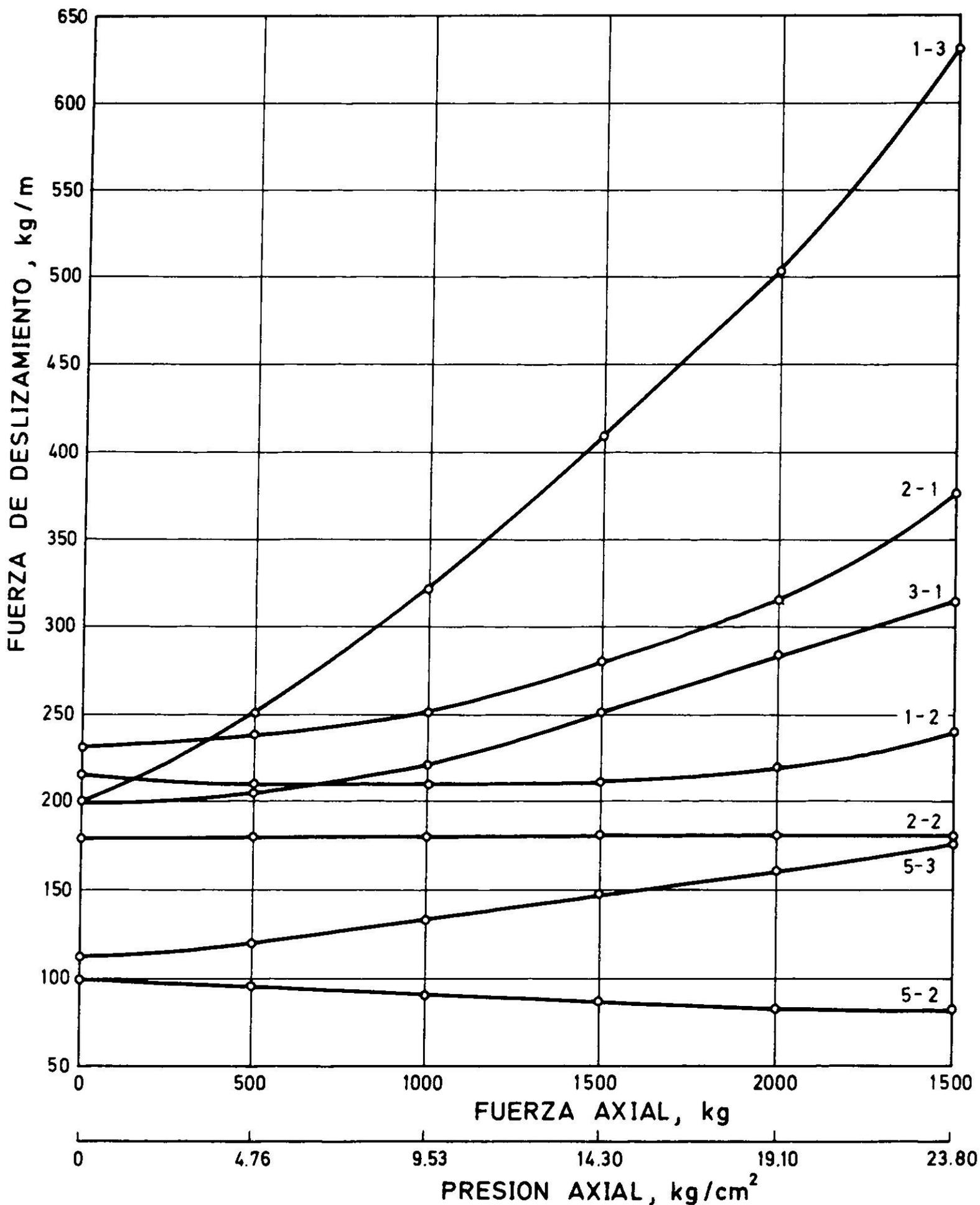


Fig. 4. Fuerza de deslizamiento por metro lineal de hormigón.

En la Fig. 4 aparecen algunos de los resultados de estas mediciones. Puede juzgarse en ella que el instrumento distingue bien entre hormigones de deslizamiento fluido (5-2; 1-2 y 5-3) y hormigones de deslizamiento friccional (3-1; 2-1 y 1-3). Estos dos grupos también quedaban diferenciados en igual forma en un ensayo anterior. En otros hormigones la coincidencia es más débil.

Hay que hacer notar que la resistencia al deslizamiento comprende la fricción del equipo mismo, la cual se determinó separadamente y resultó ser del mismo orden que la del hormigón y con fluctuaciones grandes.

Esto indica que el equipo necesita ajustes de montaje para mejorar su precisión y reproducibilidad y que en el estado actual sus resultados sólo pueden tomarse con carácter cualitativo, para ordenar aptitudes de bombeo, por ejemplo, pero no permiten precisar las diferencias cuantitativamente.

### CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo era obtener un equipo de laboratorio para medir la aptitud de bombeo del hormigón en forma directa y simple y este objetivo se cumplió en su parte principal. El aparato que se ideó para medir la resistencia a la fricción del hormigón impulsado por bomba a través de una tubería es de operación y manejo adecuado para uso en laboratorio. Sin embargo, requiere algunos perfeccionamientos para quedar a punto. Tres son los aspectos que deben mejorarse.

Uno es el que se refiere a hacer más fácil la colocación del hormigón en el interior del tubo y consecuentemente su desalojo una vez terminado el ensayo, que fueron operaciones que produjeron muchas dificultades en estas experiencias. Esto se puede lograr dividiendo el tubo en varios trozos, que se llenarían o vaciarían separadamente, y que tuvieran acoplamiento relámpago para un armado rápido.

Otro tiene que ver con la reducción de la resistencia friccional del sistema de pistones y tirantes de deslizamiento y de las fluctuaciones de los valores de esa resistencia, que en el estado actual del aparato son muy altas y conspiran contra la precisión del ensayo. Para lograr estas reducciones basta con hacer ajustes mecánicos que perfeccionen la alineación de las piezas y disminuyan los rozamientos.

Por último el tercero es poder variar la velocidad para medir también la dependencia entre ella y la resistencia al deslizamiento. Este es un dato indispensable para calcular el rendimiento de la operación de bombeo. Para ello hay que cambiar el sistema de impulsión.

Con esos perfeccionamientos el aparato sería un buen instrumento de laboratorio para probar la aptitud de bombeo de diversas mezclas con gran expedición.

## BIBLIOGRAFIA

1. Vertical pumping record 1030 feet. *Concrete Construction*, vol. 27, n° 1 (enero 1982) pp. 59–61.
2. WEBER, R. *Transporte de hormigón por tuberías*, Edición Urmo, 1968, 147 pp.
3. JOISEL, M.A. Recherche sur les pompes à béton. *Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics*, n° 204, septiembre 1951, 18 pp.
4. EDE, A.N. The resistance of concrete pumped through pipelines. *Magazine of Concrete Research*, vol. 27, n° 9 (mayo 1957) pp. 129–140.
5. BROWNE, R.D. y BAMFORTH, P.B. Tests to establish concrete pumpability. *Journal of the American Concrete Institute, Proceedings*, vol. 74, n° 5, (mayo 1977) pp. 193–203.
6. MORINAGA, S. Pumpability of concrete and pumping pressure in pipelines. *Fresh Concrete Rilem Seminar Proceeding 1973*, volumen 3, pp. 7.3–1 a 7.3–39.
7. TATERSALL, G.H. y BLOOMER, S.J. Further development of the two-point test for workability and extension of its range. *Magazine of Concrete Research*, vol. 31, n° 109 (diciembre 1979), pp. 202–210.
8. RENERE, Ch. *Estudio experimental del hormigón colocado con bomba*. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, noviembre 1982.

## A PROCEDURE TO TEST THE PUMPABILITY OF CONCRETE

## SUMMARY

*An apparatus is described to test concrete pumpability. It consists mainly of a pipe that is forced to slide against the frictional resistance of concrete which is kept in a fixed position inside the tube while it is at the same time subjected to pressure and a device to measure the force needed to set the pipe in motion.*

*The apparatus was tested in an experimental program and its performance and results were found to be qualitatively acceptable even though some adjustments are yet needed for it to be ready for use as a laboratory pumpability tester.*