

687-25

# Control del hormigón fresco

**Dr. Ing. W. HEILMANN**

**Universidad Técnica de Dresden**

**Baustoffindustrie, febrero 1971, nº 2, pág. 44**

La calidad del material de construcción hormigón no puede comprobarse hasta que el hormigón se ha solidificado y endurecido; entonces ya no es posible influir en ella. Por lo tanto, es necesario inspeccionar el hormigón fresco después de mezclados sus diversos componentes, o sea antes de colocarlo, sobre todo con respecto a sus propiedades, que son las que le hacen apropiado para la tecnología de elaboración prevista. Se investigará, por lo tanto, la determinación de la trabajabilidad del hormigón fresco, a fin de permitir la caracterización numérica de las propiedades más importantes y con ello el control por medio de un método práctico.

## **Propiedades del hormigón fresco**

Las *fuerzas físicas* fundamentales, que actúan en el hormigón fresco, como son las fuerzas de cohesión, rozamiento, capilares y de gravedad, son difíciles de determinar. Aún más difícil es integrarlas en un índice expresivo de la trabajabilidad.

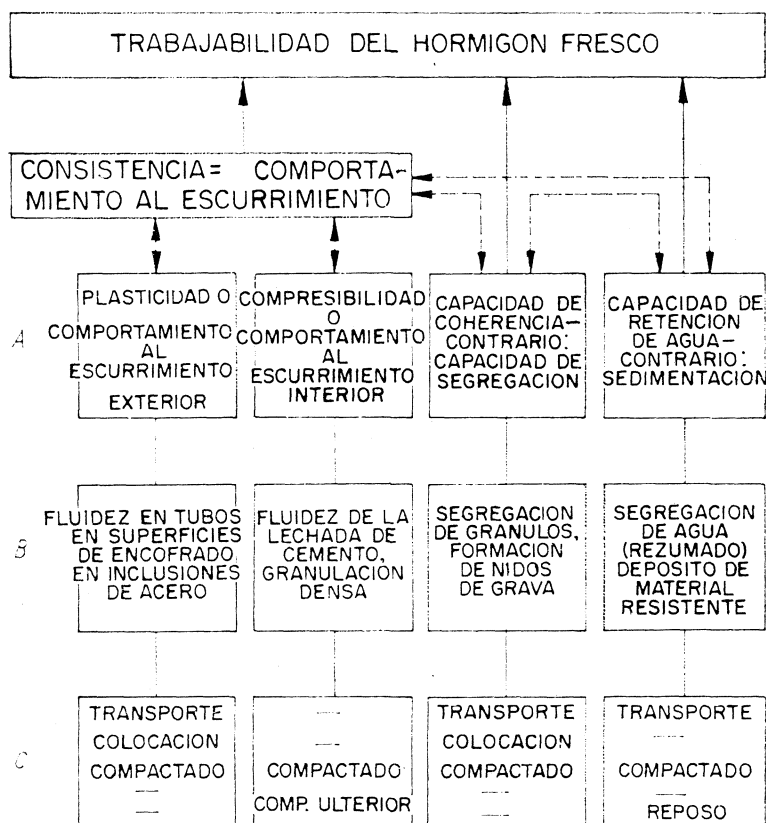
El estado de los conocimientos de la *reología* no es todavía suficiente en la actualidad como para comprender el comportamiento del hormigón fresco. Esto se apoya en que el hormigón fresco es de una composición muy heterogénea en cuanto al tamaño de sus componentes. Únicamente la lechada de cemento y las partes finísimas coadyuvan a la fluidez del hormigón; los áridos gruesos influyen como elementos perturbadores.

Desde el punto de vista de la *técnología del hormigón*, las propiedades del hormigón fresco pueden ser comprendidas y ordenadas mejor (tabla I). Es la determinación del hormigón fresco a ser elaborado; por lo tanto, la elaboración es su propiedad más importante. La consistencia es su elemento más esencial y se define como sigue: "La consistencia del hormigón fresco es el concepto general de las propiedades de todo el comportamiento de fluidez y tiene por contenido la resistencia del hormigón a la deformación y a la compactación". Además de la consistencia, en la que están contenidas la plasticidad y la compresibilidad, la trabajabilidad se determina también por la capacidad de coherencia y de retención del agua. Entre estos elementos existen relaciones y dependencias.

Las influencias de estos elementos en la trabajabilidad son en parte de efecto homogéneo, en parte de efecto diferente. De aquí se deduce que la trabajabilidad como concepto general no puede expresarse por un valor medido de validez general. Para la elaboración práctica, la trabajabilidad sólo puede dictaminarse relativamente para el método de elaboración.

TABLA I

Propiedades del hormigón fresco desde el punto de vista de la tecnología del hormigón



OBSERVACION :

- A. PROPIEDADES PARTICULARES TECNOLOGICAS DEL HORMIGON
- B. INFLUENCIA DE A EN LOS PROCESOS TECNOLOGICOS DEL HORMIGON CITADOS EN B
- C. INFLUENCIA DE A EN LOS PROCESOS DE ELABORACION CITADOS EN C

La consistencia puede medirse, y puede tomársela para dictaminar (no medir) la trabajabilidad, porque es la característica más esencial de ésta y porque las otras características, la capacidad de coherencia y de retención de agua, pueden ser dominadas fácilmente por determinadas reglas de preparación de las recetas. Una medición de sólo la plasticidad o de sólo la compresibilidad permite un dictamen menos preciso de la trabajabilidad que una medida de la consistencia.

**Métodos de medida existentes**

Existen multitud de métodos de medida distintos, los cuales deben aclarar todos los aspectos sobre la trabajabilidad del hormigón fresco. Una ordenación sistemática de los métodos presupone que se busca un denominador común. Cada método está estructurado fundamentalmente como sigue:

- A. Las partículas de hormigón fresco reciben siempre un movimiento relativo, es decir, al hormigón se le fuerza a un cambio de estado.
- B. A fin de llegar al cambio de estado, en cada caso hay que emplear una fuerza o energía determinadas.
- C. El valor medido se obtiene midiendo el cambio de estado alcanzado o la fuerza empleada.

En la tabla II se han reunido las posibilidades por separado. A cada método puede asignarse así un número de orden de sistematización de tres guarismos. De acuerdo con este orden de sistematización, los métodos conocidos se han agrupado en la tabla III. Una descripción detallada de los diversos métodos está contenida en [1].

T A B L A II

*Principio de ordenación de los métodos de medida de la consistencia*

A Cambio de estado	B Fuerza	C Medición
1 Transformación	1 Gravedad del hormigón	1 Longitud
2 Colocación	2 Gravedad de un cuerpo	2 Angulo
3 Escurrimiento	3 Golpes diversos	3 Tiempo
4 Compactado	4 Golpes de choque	4 Masa
5 Penetración	5 Energía vibratoria	5 Diagrama
6 Elasticidad	6 Presión	6 Número de golpes
7 Corte	7 Empuje	7 Fuerza o tensión
	8 Fuerza elástica	8 Dilatación elástica
	9 Magnetismo	9 Atenuación de vibraciones
	10 Motor eléctrico	10 Magnitudes eléctricas
		11 Observaciones subjetivas

Para establecer el método, es necesario tener ideas claras sobre las condiciones que hay que exigirle para que sea idóneo:

1. La consistencia ha de medirse en su totalidad.
2. Ha de ser posible vigilar la producción. Para ello se necesita:
  - 2.1. Reducido consumo de trabajo.
  - 2.2. Manejo sin complicaciones.
  - 2.3. Corta duración de la medida.
  - 2.4. Resultado de la medición legible inmediatamente.
  - 2.5. Formación objetiva de los valores medidos.
  - 2.6. Resultado expresivo de la medición.
  - 2.7. Amplia gama de medición.
  - 2.8. Pocas averías.
3. Ha de existir la posibilidad de la automatización.

Un análisis de los 58 métodos contenidos en la tabla III ha dado por resultado que estos requerimientos solo pueden cumplirse por el principio del escurrimiento [2]. Esto se explica esencialmente porque en el escurrimiento (A 3 según tabla II) se abarca el comportamiento de fluidez del hormigón fresco, o sea la consistencia en su totalidad, ya que puede producirse tanto una transformación como simultáneamente una compactación del hormigón a ensayar (requerimiento "1"), si el aparato está estructurado convenientemente. Todos los demás métodos abarcan sólo una propiedad. Así, por ejemplo, se abarca preferentemente la propiedad de transformación de los métodos A 1, A 2, A 5 y A 7 (según tabla II) o la propiedad de la compactación del método A 4 (según tabla II). Los métodos A 6 y A 7 (según tabla II) son tan complicados en su estructura y en su realización, que sólo se puede hacer uso de ellos para análisis de laboratorio especiales. En cuanto al cumplimiento de los importantes requerimientos "2" de reducido consumo de trabajo y corta duración de la medida, el principio del *escurrimiento* es superior a todos los demás métodos, ya que en ellos no tiene lugar el proceso de consumo de trabajo y tiempo del vaciado del recipiente de ensayo. Partiendo de este principio se cumple al mismo tiempo el requerimiento "3", para la automatización. Todos los métodos conocidos hasta ahora del principio del escurrimiento no aprovechan del todo sus ventajas, debido a que el funcionamiento de los aparatos depende todavía de un consumo de trabajo manual demasiado elevado y la obtención del valor medido puede ser influida subjetivamente. Fue, por lo tanto, necesario desarrollar un nuevo aparato con arreglo al principio del escurrimiento.

### **Aparato de circulación recientemente desarrollado**

El aparato patentado recientemente [3] (fig. 1) se compone de un recipiente en posición vertical, cilíndrico, cuyo remate inferior lo constituye un suplemento cónico, que posee una abertura de salida que puede cerrarse. Directamente en el recipiente hay montado un vibrador exterior. Un disco metálico va unido a una barra-guía, en la que hay una regleta de empalme, y dispuesto en forma móvil en dirección del eje vertical del recipiente. Un microcronómetro eléctrico se pone en marcha por medio de un final de carrera accionado por la regleta de empalme y mide la duración de la salida de la cantidad de hormigón entre posición de conexión y desconexión.

El aparato de circulación (fig. 2) va suspendido con un robusto soporte, a través de aisladores oscilantes, en un bastidor a modo de mesa y a una altura de trabajo cómoda.

Funcionamiento del aparato: El hormigón a ensayar se vierte en el aparato (fig. 3), no teniendo que tener en cuenta más que el llenado llegue por lo menos al borde superior del cerco del recipiente. El sobrepasarlo no perturba el resultado de la medida. Se baja el disco sobre el hormigón, se conecta el vibrador y se deja libre el orificio de salida. El proceso de medida continúa después automáticamente. El hormigón comienza a derramarse. El disco, que al principio baja rápidamente, hace más lento su movimiento y llega a una velocidad descendente constante. Sólo, después de disminuir las interrupciones iniciales, pasa el disco por la posición de conexión, y el reloj de paro empieza automáticamente la medición del tiempo hasta que el disco pasa por la posición de desconexión, con lo que la medición del tiempo concluye automáticamente. El resultado puede leerse rápidamente por la posición de la manecilla del reloj de paro. El resto del hormigón sale y puede desconectarse el vibrador.

TABLA III  
Agrupamiento de los métodos de medida de la consistencia

Principio de ordenación			Número del principio de ordenación OPZ	Métodos de medida de la consistencia	
Cambio de estado	Fuerza	Medición			
Transformación	Gravedad del hormigón	Longitud	1.1.1	Cono de asiento según Abrams = slump test TGL 21093	
			1.1.1	Cono de asiento según GOST 10 181-62	
			1.1.1	Artesa de fluencia según Burmister	
	Golpes sueltos	Longitud	1.3.1	Ensayo de escurrimiento TGL 0-1048, 117-0112	
			1.4.1. — 6	Ensayo de escurrimiento según Powers = flow table	
	Golpes de choque	Longitud o número	Número de golpes	1.4.6	Medida del asiento según Powers
				1.4.6	Medidor de rigidez ONA norma austriaca B 2302 § 3
				1.4.6	Aparato de deformación según Powers
	Energía vibratoria	Tiempo		1.5.3	Aparato Vebe según Bährner TGL 21 093
				1.5.3	Mobilímetro según Erikson
1.5.3				Viscosímetro técnico según Desow GOST 10181	
1.5.3				Consistómetro grande según Stork	
1.5.3				Método según Skramtajew, GOST 10181-62	
1.5.3				Ensayo de deformación según DBA Leipzig	
Presión	Longitud o ángulo		1.6.1. — 2	Medición de la plasticidad según Berthier	
			1.6.1. + 7	Medición de la trabajabilidad según Ney DIN 1060	
Colocación	Gravedad de un cuerpo	Longitud	2.2.1	Ensayo de colocación según Graf TGL 0-1048, 117-0112	
			2.2.1	Ensayo de colocación según Kelly	
	Golpes sueltos	Longitud	Número de golpes	2.3.1	Profundidad de colocación según Ewers
				2.3.6	Sonda de hormigón según Humm
	Golpes de choque	Longitud o número	Número de golpes	2.4.1. — 6	Ensayo de colocación según Humm
				2.4.6	Ensayo de colocación según Pearson
	Energía vibratoria	Tiempo		2.4.6	Consistómetro según Wigmore
				2.5.3	Ensayo de penetración según Komlos
				2.5.3	Ensayo de vibración según Faury
				2.5.3	Viscosímetro vibratorio de caída de bola
Diagrama			2.5.3	Subida de bolas huecas	
			2.5.5	Varilla sumergida según Flagemann	
			2.5.5	Aparato según Aredi	
Escurrecimiento	Choques sueltos	Número de golpes	3.3.6	Aparato tubular según Nycander	
	Energía vibratoria	Longitud	3.5.1	Capacidad de fluencia según Faury	
			Tiempo	3.5.3	Rigidez del cono según Pilny I, II y III
				3.5.3	Medidor de movilidad M3 según Pavlik y Hollanom
				3.5.3	Aparato de escurrimiento según B. W. Naunhof
				3.5.3	Medición de la trabajabilidad según Albertville
	Diagrama		3.5.5	Medición de la trabajabilidad según Bertschinger	
Observación subjetiva		3.5.11	Embudo de paso según Fritsch		
Compactado	Caída del hormigón	Masa	4.1.4	Factor de compactación según Granville	
	Energía vibratoria	Longitud	4.5.1	Medida de compact. según Walz TGL 117-0112, 21093	
			Tiempo	4.5.3	Gasto de compactación según Powers
				4.5.3	Viscosímetro técnico según Sizow
			Masa	4.5.4	Medición comparativa de la densidad aparente
Diagrama		4.5.5	Voluntad vibratoria según Fritsch I. II		
Penetración	Gravedad de un cuerpo	Ángulo	5.2.2	Varilla según Desow	
	Gravedad y vibrado	Diagrama	5.2. + 5.5	Vibroviscosímetro según Fajtel'son	
	Fuerza elástica	Dilatación elástica	5.8.8	Plastografo	
	Motor eléctrico	Tensión	5.10.7	Esfuerzo del eje motriz de la mezcladora	
		Dilatación elástica	5.10.8	Viscosímetro rotatorio T-3 según Komlos	
		Magnitudes eléctricas	5.10.10	Plastografo de Brabender	
		5.10.10	Absorción de potencia de la mezcladora según Walz		
Elasticidad	Fuerza elástica	Atenuación de las vibraciones	6.8.9	Medidor de deformabilidad según Forslind	
	Magnetismo	Atenuación de las vibraciones	6.9.9	Medidor de la deformación según Bergstrom	
Corte	Energía vibratoria + motor eléctrico	Fuerza	7.5. + 10.7	Medición de la rigidez según L'Hermite	
	Presión + empuje	Fuerza	7.6. + 7.7	Medidor del empuje de rotación K-3 según Komlos	
	Presión + motor eléctrico	Fuerza	7.6. + 10.7	Aparato anular según Heinz	
	Empuje	Tiempo	7.7.3	Viscosímetro rotatorio según Backman	
	Empuje + fuerza elástica	Dilatación elástica	7.7. + 8.8	Viscosímetro rotatorio según Dellyes	

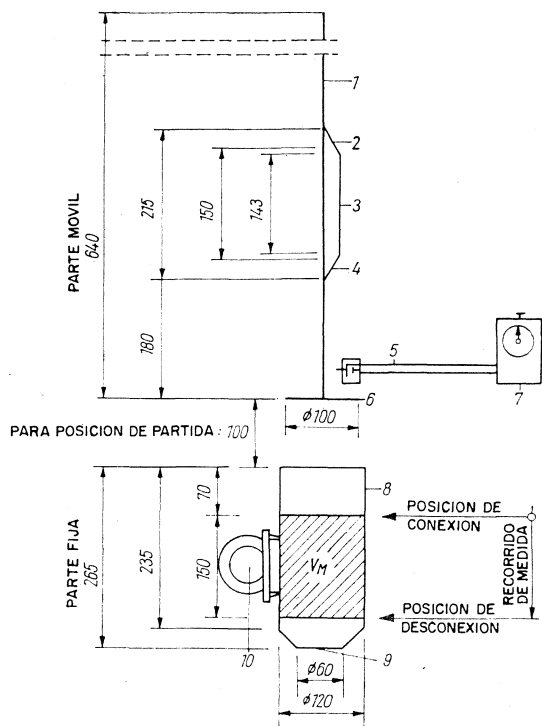


Fig. 1.—Esquema de construcción del aparato de circulación. 1. Barra-guía. 2. Punto de conexión "Aus" (desconectado). 3. Regleta de conexión. 4. Punto de conexión "Ein" (conectado). 5. Final de carrera (fijo). 6. Disco. 7. Reloj eléctrico de paro. 8. Recipiente. 9. Abertura de desparramado. 10. Vibrador exterior, 8.650 min<sup>-1</sup>.

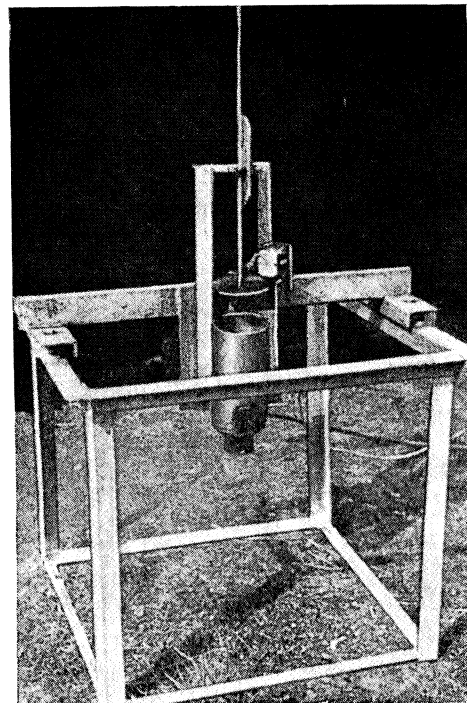


Fig. 2.—Aparato de circulación.

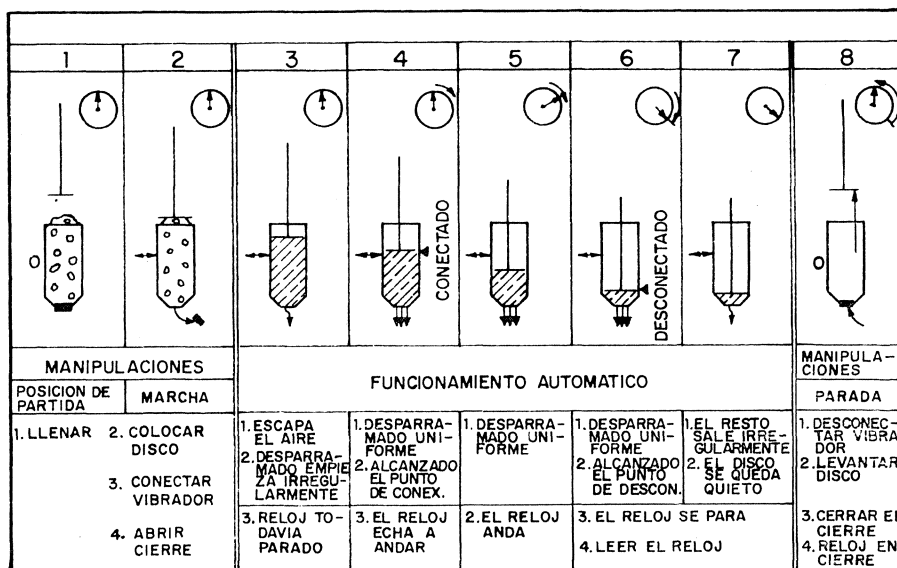


Fig. 3.—Proceso de medida del aparato de circulación.

El resultado de la medición no queda influido por ninguna de las manipulaciones necesarias. O sea que se produce objetivamente. Inmediatamente después de la medición se halla el aparato libre para la prueba siguiente y después de tres manipulaciones sencillas está otra vez preparado para ser utilizado.

### **Realización de los ensayos**

Las medidas dadas al aparato han sido consideradas óptimas con el siguiente material:

- cemento portland PZ 350;
- gravilla con tamaño máximo de 15 mm;
- grava con tamaño máximo de 30 mm;
- composición granulométrica, según línea de cribado D, E y F;
- proporciones de mezcla, 1:4,8; 1:5,5; 1:6,4 y 1:9,6, y
- el contenido de agua se varió desde cero hasta agotar la capacidad de retención de agua.

En un programa sistemático de ensayos, además de las medidas con el nuevo aparato de circulación, se llevaron a cabo medidas comparativas con los siguientes aparatos:

- Cono de asiento (TGL 21 093);
- ensayo de escurrimiento (TGL 117-0112);
- ensayo de penetración (TGL 117-0112), y
- aparato Vebe (TGL 21 093).

El curso típico de los valores medidos para los tiempos de salida en función del contenido de agua se ha reunido en el ejemplo del hormigón con árido rodado según línea E representado en la figura 4. Si el contenido de agua se va aumentando continuamente a partir de cero, los tiempos de circulación se subdividen en tres zonas:

1. Los tiempos de paso son pequeños y constantes.
2. Aumentan muy repentinamente y alcanzan un valor máximo.
3. Disminuyen al principio rápidamente y luego más lentamente.

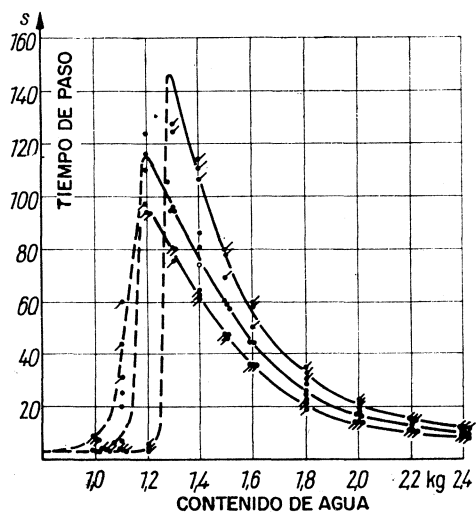
El aspecto exterior del proceso puede describirse en estas tres zonas como sigue:

1. El hormigón se esparce hacia fuera.
2. El hormigón se desmenuza hacia fuera.
3. El hormigón fluye al exterior.

Solo la zona en que fluye el hormigón presenta el contenido de agua que es necesario para la elaboración.

La influencia del contenido de cemento en los tiempos de paso se ve, asimismo, en la figura 4. El hormigón con el pequeño contenido de cemento (ensayo n.º 30 en la figura 4) posee una pequeña superficie específica. Por consiguiente, el rociado de sus componentes se logra ya con un pequeño contenido de agua, y se inicia el efecto de aglomeración. Esto se aprecia porque la curva sube rápidamente hacia arriba. Con mayor contenido de cemento (ensayos núms. 31 y 32 en la figura 4) este fenómeno no se produce hasta un contenido de agua correspondientemente mayor, pero en cambio se producen valores máximos mayores de los tiempos de paso. También en el curso siguiente de la curva se aprecia un mayor consumo de agua de las mezclas ricas en cemento debido a los tiempos de paso más prolongados.

La influencia de la composición granulométrica en los tiempos de paso aparece muy marcada y se lee en la figura 5. Mezclas ricas en arena, pobres en agua (línea de cribado F con 7 a 8 por ciento de contenido de agua) necesitan de un gran consumo de agua para la elaboración práctica. Este hecho se refleja por los tiempos de paso muy largos. En cambio, mezclas con mucho árido grueso, pobres en agua (línea de cribado D con 5 a 6 por ciento de contenido de agua), necesitan menos consumo de agua para la elaboración. Esto se aprecia por los cortos tiempos de paso.



ENSAYO Nº	REPRESENTACION	MV	CONTENIDO DE CEMENTO
32	•	1:4,8	4,0 kg/MASA DE ENSAYO
37	•	1:5,5	3,5 kg/MASA DE ENSAYO
30	•	1:6,4	3,0 kg/MASA DE ENSAYO

Fig. 4.—Tiempos de paso de hormigón de árido rodado; línea de cribado E.

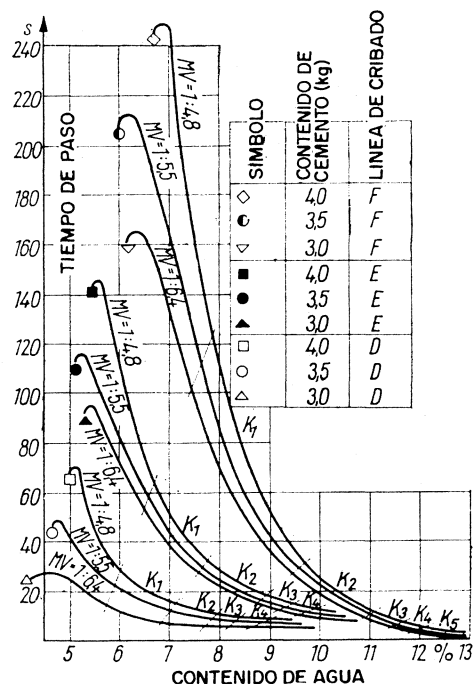


Fig. 5.—Tiempos de paso de hormigón de árido rodado; línea de cribado D, E y F.

Mezclas ricas en arena, ricas en agua (línea de cribado F con 12 a 13 por ciento de contenido de agua) poseen una capacidad de flujo muy buena (hormigón fluido) y, en consecuencia, alcanzan tiempos de paso tan cortos como jamás se consiguen por mezclas ricas en agua (línea de cribado D con 8 a 9 por ciento de contenido de agua), ya que su facultad de retener el agua se agota pronto.

Los tiempos de paso reflejan bien la trabajabilidad práctica. Por las líneas características de los otros métodos no se reconocen estas relaciones (figura 6). La influencia de la fuerza aplicada en el método se aprecia porque, con intensidad reducida, las líneas características con contenido ascendente de agua son, al principio, de curso plano y después más empinado (1.ª a 3.ª columna en la figura 6), mientras que con métodos que actúan con fuerzas más intensas en el hormigón —como es la energía vibratoria— al principio se producen líneas características más empinadas y después más planas (4ª columna en la figura 6).



La influencia de la clase de cambio de estado del método empleado, da por resultado que los métodos que únicamente miden una propiedad (es decir sólo la plasticidad o sólo la compresibilidad) producen líneas características paralelas (1.<sup>a</sup>, 2.<sup>a</sup> y 4.<sup>a</sup> línea en la figura 6). Pero si se mide la consistencia en su totalidad (es decir, plasticidad y compresibilidad juntas), resultan entonces líneas características que no van paralelas (3.<sup>a</sup> línea en la figura 6) y que corresponden a la trabajabilidad real de mezclas de hormigón según líneas de cribado D, E ó F.

El hecho de que los tiempos de paso caractericen la trabajabilidad mejor que otros métodos, se mostrará todavía desde otro punto de vista. El volumen de poros del hormigón fresco en el hormigón elaborado es el resultado de la elaboración en función de la trabajabilidad. Por ensayos de [4] se ve (fig. 7) que entre valores medidos por el aparato Vebe y el contenido de aire en el hormigón fresco compactado no existen relaciones, a pesar de que todas las muestras fueron elaboradas del mismo modo. Se llega a la conclusión de que por los grados Vebe no se refleja la trabajabilidad. Si las propiedades del hormigón fresco de las muestras de la figura 7 se expresan con ayuda de los tiempos de paso (fig. 8), entonces se ve claramente una relación lineal entre el volumen de poros del hormigón fresco y los tiempos de paso, con lo que se confirma la capacidad de afirmación de los tiempos de paso con respecto al resultado que se espera después de la elaboración.

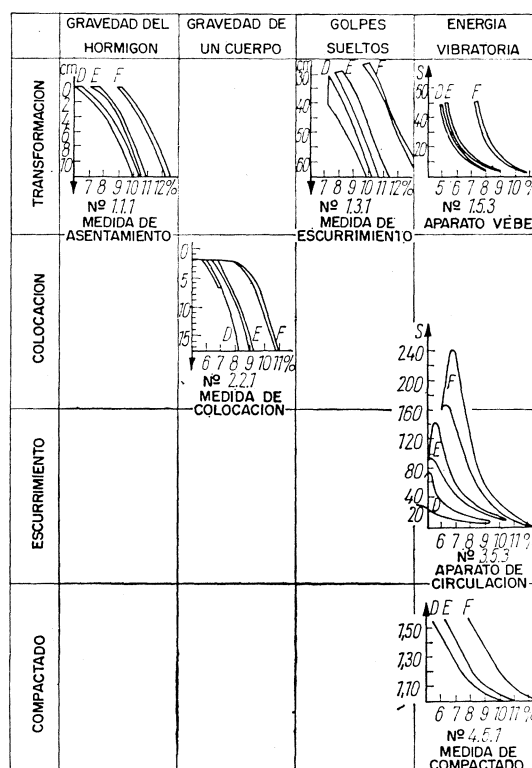


Fig. 6.—Confrontación de las líneas características de los métodos de medida.

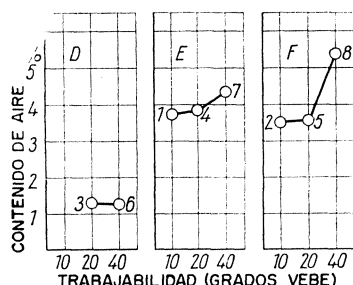


Fig. 7.—Resultados de la determinación del volumen de poros con el método de presión según [4].

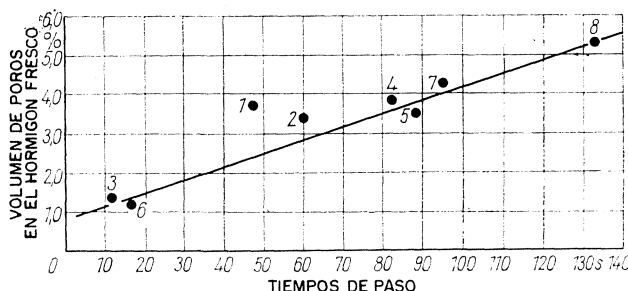


Fig. 8.—Relación entre el volumen de poros en el hormigón fresco y los tiempos de paso con trabajo de compactado de igual magnitud.

De las mediciones prácticas que se realizaron durante la producción continua, en la figura 9 se ha representado como ejemplo la serie de mediciones n.º 86. La línea característica de la receta de preparación de hormigón prescrita manifiesta para el contenido nominal de agua de  $142 \text{ l/m}^3$  el tiempo nominal de paso de  $64 \text{ s}$ . Por los resultados de las mediciones registradas de las cargas de mezcla 1 a 12 se observa que continuamente existía un contenido de agua mayor que el prescrito. En el ejemplo mostrado se reconocen fuertes oscilaciones de las propiedades del hormigón fresco entre las diferentes cargas de mezcla.

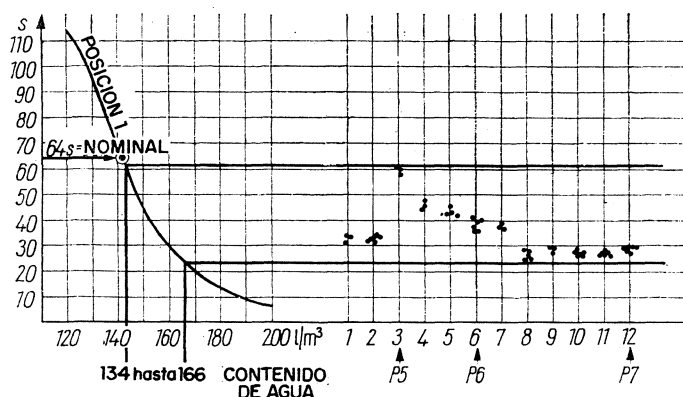


Fig. 9.—Tiempos de paso, medidos en la producción de cubiertas huecas de hormigón pretensado; ensayo n.º 86.

Posición 1 | Contenido nominal de cemento  $400 \text{ kg/m}^3$ .  
 Contenido nominal de agua  $142 \text{ kg/m}^3$ .

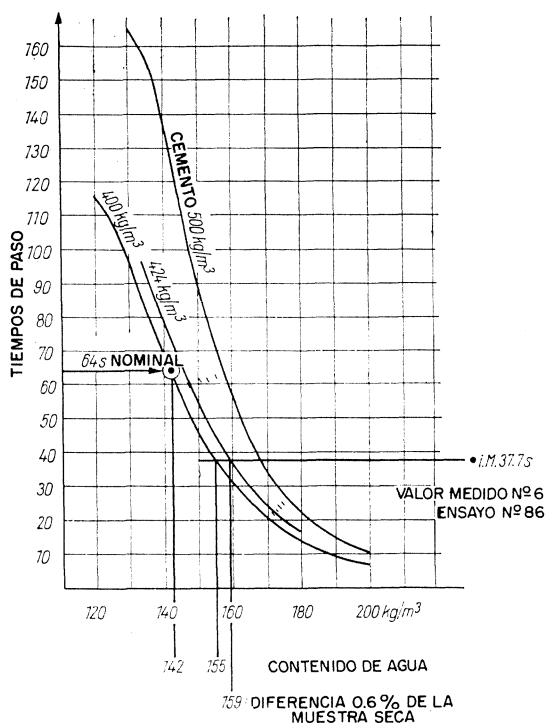


Fig. 10.—Prueba P 6 como comparación del tiempo de paso de  $37,7 \text{ s}$  con los resultados de la muestra seca: agua =  $160 \text{ kg/m}^3$ ; muestra lavada: cemento =  $424 \text{ kg/m}^3$ .

A efectos de control se procedió por ejemplo para la carga 6 —el valor medio del tiempo de paso es  $37,7 \text{ s}$ — a una prueba de secado y lavado P 6. Los resultados se hallan representados en la figura 10. En combinación con el contenido nominal de cemento de  $400 \text{ kg/m}^3$  el tiempo de paso de  $37,7 \text{ s}$  representa un contenido de agua de  $155 \text{ l/m}^3$ . Pero la muestra seca acusó  $160 \text{ l/m}^3$  como contenido de agua.

La diferencia estriba en la inexacta adición de cemento. La prueba de lavado acusó un contenido de cemento de  $424 \text{ kg/m}^3$ . Si se promedia la línea característica con este contenido de cemento y con el tiempo de paso medido de  $37,7 \text{ s}$ , resulta un contenido de agua de  $159 \text{ l/m}^3$ , que coincide bien con la muestra seca de  $160 \text{ l/m}^3$ .

## RESUMEN

1. Con el nuevo aparato de circulación (de paso) se mide la consistencia en su totalidad; de este modo es más fácil dictaminar la trabajabilidad del hormigón fresco que con los métodos empleados hasta la fecha.
2. En el control de la producción, el aparato de circulación acusa con seguridad diferencias de preparación de las recetas prescritas. Pero, sin embargo, no es posible reconocer la causa de la diferencia por el único valor medido que suministra el aparato. Ahora bien, como quiera que en la mayoría de los casos es posible dosificar exactamente áridos y cemento, con el aparato puede comprobarse el contenido de agua.
3. Los diversos requerimientos citados anteriormente los cumple bien el aparato de circulación. Hay que resaltar sobre todo que el valor medido no puede ser influido en ningún caso por el manejo del aparato, es decir, el valor medido se produce en forma totalmente objetiva. Otra ventaja muy importante frente a todos los demás aparatos consiste en la corta duración del ensayo. Como consecuencia de ello, por primera vez es posible obtener en brevísimo tiempo un número suficientemente grande de mediciones para concepciones matemático-estadísticas.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] LUDWIG, E., HELLMANN, W.: Konsistenzmessung des Frischbetons. Forschungsbericht, TU Dresden, Institut für Baubetriebswesen, Plan Nr. 45 07 74/GF-5/016/3.
- [2] HELLMANN, W.: Die Konsistenz des Frischbetons, ihre Messung und die Beziehungen zur Verarbeitbarkeit. Dresden 1968. Technische Universität Dresden, Dr. Ing. Dissertation.
- [3] HELLMANN, W.: Patent WP 80 a, 6/01 (129 343) — DWP 65 365.
- [4] SCHULZE, W., REICHEL, W.: Methoden zur Bestimmung des Porenraumes, BAUSTOFFINDUSTRIE 10 (1967) H. 1, S. 5 bis 7, und H. 2, S. 43-47.