

## **CALIBRACION DE MODELOS DE PREDICCIÓN DE LA RETRACCIÓN HIDRAULICA A HORMIGONES FABRICADOS CON CEMENTOS CHILENOS**

### **CALIBRATION OF DRYING SHRINKAGE PREDICTION MODELS FOR CHILEAN CEMENT CONCRETES**

**Por/By Carlos Videla, Juan P. Covarrubias, Cristian Masana**

#### ***Resumen***

Diferentes modelos han sido propuestos en la literatura especializada para cuantificar la retracción hidráulica del hormigón, para su uso en la etapa de diseño de estructuras. Sin embargo, existe incertidumbre sobre la validez de su extrapolación a condiciones diferentes a las utilizadas en su derivación, particularmente debido a diferencias en las características de cementos y áridos entre países. Por lo tanto, este artículo evalúa y destaca la necesidad de calibrar los modelos de predicción de retracción hidráulica existentes a condiciones locales. El programa experimental ejecutado incluyó 8 mezclas de hormigón de similar resistencia, fabricadas con cemento Portland y Portland Puzolánico y que representan hormigones comúnmente utilizados localmente. Los ensayos se realizaron en 72 probetas y la retracción hidráulica fue medida hasta los 448 días de secado, analizándose el efecto del tipo de cemento, asentamiento de cono, tamaño máximo del árido y dimensiones de la probeta. Se concluyó que la clase de cemento tiene un efecto significativo en la forma de la curva de evolución de la retracción y en su magnitud. La retracción hidráulica medida en hormigones fabricados con cemento Portland Puzolánico fue aproximadamente 25% mayor que la de hormigones con cemento Portland, a similar resistencia del hormigón. Además, la retracción hidráulica de hormigones con cemento Portland Puzolánico se desarrolla inicialmente a mayor velocidad y luego se desacelera antes que en hormigones con cemento Portland, probablemente debido al incremento de la impermeabilidad en el tiempo de hormigones con cemento Portland Puzolánico. Los resultados experimentales fueron comparados con deformaciones calculadas con los modelos ACI, CEB, B3, GZ, GL y Sakata. Se concluyó que los modelos analizados subestiman la retracción hidráulica medida, particularmente en hormigones con cemento Portland Puzolánico y no representan adecuadamente el comportamiento observado de retracción hidráulica de hormigones fabricados con materiales disponibles localmente. Por lo tanto, se calibraron los diferentes modelos de predicción para su aplicación en la etapa de diseño y se sugieren factores de corrección a condiciones chilenas y para hormigones con resistencia característica a compresión cúbica entre 30 y 40 MPa. Para la calibración de los modelos a hormigones de un proyecto específico, se recomienda un tiempo mínimo de 100 días de ensayo para tener estimaciones dentro de límites de exactitud normalmente aceptados.

**Palabras Clave:** retracción hidráulica, hormigón, modelos de predicción, calibración, cemento Portland Puzolánico, cemento Portland, factores de calibración, ensayos.

#### ***Abstract***

Different models reported on specialized literature have been proposed for quantifying concrete drying shrinkage at the design stage of concrete structures. However, questions have been

raised regarding their applicability to conditions different to those used in their derivation, particularly with respect to differences in cement and aggregate characteristics from country to country. Therefore, this paper evaluates and highlights the need for updating proposed concrete shrinkage prediction models to local conditions. The experimental program was carried out on 8 concrete mixtures of similar strength, manufactured with Portland and Blended Portland Cement which represent the most commonly used local concretes. Tests were conducted on 72 specimens and drying shrinkage strains were measured up to 448 days of drying to investigate the effect of cement type, slump, aggregate maximum size and specimen dimension on concrete shrinkage. It was concluded that the type of cement had a significant effect on drying shrinkage time development and magnitude. Shrinkage exhibited by concrete mixtures made with Portland Pozzolan cement was approximately 25 % higher than those of similar strength mixtures made with Portland cement. Furthermore, shrinkage of Portland Pozzolan cement concretes increased initially at a much faster rate and then slowed down earlier than Portland cement concretes probably due to the increased impermeability of Portland Pozzolan cement concretes. Test results were compared with strain predictions from ACI, CEB, B3, GZ, GL and Sakata models. It was concluded that all analyzed shrinkage models highly underestimated shrinkage strains observed in this study, particularly for Portland Pozzolan cement concrete and do not adequately represent the observed shrinkage behavior of concretes made with locally available materials. Therefore, prediction models were calibrated for their use at the design stage and correction factors are suggested for Chilean conditions and for concretes with characteristic compressive cube strengths in the range of 30 to 40 MPa. For model calibration to concrete of a specific project, a minimum testing time of 100 days is recommended to estimate shrinkage within normally accepted accuracy limits.

**Keywords:** drying shrinkage, concrete, prediction models, calibration, Portland Pozzolan cement, Portland cement, calibration factors, tests.

## 1. INTRODUCCION

Es mundialmente reconocido que la retracción hidráulica del hormigón puede producir fisuración y deformación de las estructuras, las que pueden afectar seriamente la durabilidad, serviceabilidad, capacidad estructural, estética y costos de construcción de una obra (Neville, 1996; Campbell-Allen, 1979). Por las implicancias de este fenómeno se han propuesto diversos modelos para predecir su evolución y magnitud, y mucho se ha discutido sobre cuál debería ser el modelo que debiera ser utilizado en la etapa de diseño de estructuras y sobre cuáles serían los métodos estadísticos apropiados para evaluar su exactitud respecto a datos experimentales (Al Manaseer y Lahsmikantan, 1999). Debido a que el fenómeno de retracción presenta alta variabilidad y depende fuertemente de las propiedades del hormigón, arbitrariamente se ha propuesto que un modelo es aceptable en la etapa de diseño, en que se no se cuenta con información respecto al hormigón específico a utilizar, si el coeficiente de variación es menor que 30% (ACI, 1999).

Por otra parte, las grandes diferencias entre los modelos de predicción existentes y el cuestionamiento respecto a si la base de datos RILEM (Kuttner, 1997), utilizada para desarrollar o comparar estos modelos, es representativa de hormigones usados hoy en día, hacen pensar que el problema de la selección de un modelo y de la exactitud de la predicción estaría aún lejos de

resolverse. A este respecto es importante destacar que además hay muy poca investigación sobre el comportamiento de hormigones con cemento Portland Puzolánico, material ampliamente usado en algunos países, por lo que los modelos existentes podrían no reflejar adecuadamente su comportamiento.

Por lo tanto, es aparente que aún no existiría un método que pueda ser aceptado para uso general en todas las posibles condiciones de dosificación y de exposición del hormigón y es necesario la calibración de los modelos a las condiciones particulares de aplicación para reducir el error de la estimación. Para efectuar una adecuada calibración de los modelos a las condiciones de un determinado país o región se debería contar con resultados experimentales de retracción hidráulica de largo plazo en hormigones fabricados con materias primas locales. Sin embargo, en términos prácticos no es posible contar con dichos datos, debido al tiempo que se requeriría para alcanzar la retracción hidráulica última. Por lo anterior se requiere investigar cómo los modelos debieran ser calibrados cuando son aplicados a hormigones con materiales constituyentes de distintas características de aquellos usados en la derivación de los modelos (Bazant y Baweja, 1995c). Este último aspecto es de relevante importancia cuando se desea calibrar un modelo a condiciones locales o al hormigón específico a ser usado en una obra, debido a que los modelos son sensibles a las propiedades resistentes del hormigón, comportamiento que difiere de país en país.

## 2. OBJETIVO DE LA INVESTIGACION

El objetivo de esta investigación fue diseñar un procedimiento de calibración de modelos de predicción de la retracción hidráulica y determinar un modelo aplicable a hormigones fabricados con cementos chilenos, especialmente aquellos fabricados con cemento de la clase Portland Puzolánico.

La metodología seguida consideró evaluar la aplicabilidad de los modelos modernos disponibles en la bibliografía y determinar factores de calibración que permitieran su aplicación a condiciones locales. La utilización de un modelo existente para calibración a condiciones locales se basa en que su formulación sería el resultado de la experiencia y conocimiento del comportamiento del fenómeno, representado mediante ecuaciones obtenidas a partir de resultados de ensayos efectuados durante muchos años. Los modelos de predicción de la retracción hidráulica seleccionados para el estudio fueron: CEB 1990 (CEB, 1993), ACI (1982), GZ (Gardner y Zhao, 1993), Sakata (1993), B3 (Bazant y Baweja, 1995a) y GL (Gardner y Lockman, 2000).

## 3. METODOLOGÍA DE CALIBRACION DE MODELOS A CONDICIONES LOCALES

La forma general de los modelos de retracción hidráulica del hormigón se puede expresar según la siguiente ecuación:

$$\varepsilon'_{sh}(t, t_0) = \prod_{i=1}^n K_i f'(t, t_0) \varepsilon'_{sh, \infty} \quad (1)$$

donde  $\varepsilon'_{sh}(t, t_0)$  es la retracción hidráulica al tiempo de secado  $(t-t_0)$  días, con  $t$  edad del hormigón y  $t_0$  tiempo de curado;  $f(t, t_0)$  es una función que representa la evolución de la retracción hidráulica en el tiempo;  $\varepsilon'_{sh, \infty}$  es la ecuación para estimar la retracción hidráulica última o final y  $K_i$  son factores de corrección por diferentes variables que afectan la retracción hidráulica, como por ejemplo la humedad relativa.

La metodología general propuesta para calibrar los modelos predicción de la retracción hidráulica del hormigón consideró los siguientes pasos (Masana, 2001):

- a) Programa experimental: El primer paso es diseñar y ejecutar un programa experimental. Para tal efecto se diseña un factorial que incluya un número limitado de factores y niveles, que permitan reproducir el rango de las variables más representativas de hormigones comúnmente utilizadas en trabajos de construcción local.
- b) Análisis de resultados experimentales: Se realiza una evaluación estadística de los resultados para determinar las variables más importantes que afectan el fenómeno. Además se comparan los resultados de retracción hidráulica medidos y calculados para verificar la calidad de los modelos de predicción considerados.
- c) Evaluación de modelos: Si la retracción hidráulica calculada con alguno de los modelos de predicción estudiados reproduce adecuadamente el comportamiento observado en los ensayos, entonces es posible adoptar dicho modelo para representar las condiciones locales y puede ser validado si existen otras investigaciones disponibles para condiciones similares. Se acepta generalmente que un modelo es suficientemente exacto para propósitos de diseño si el coeficiente de variación es  $\pm 30\%$  (ACI, 1999), cuando la estimación se efectúa sin tener información sobre las características particulares de la mezcla, de sus propiedades mecánicas y del ambiente de secado del hormigón a utilizar o sobre los materiales que serán empleados durante su fabricación. Si éste no es el caso, se debe considerar la calibración del modelo según los procedimientos descritos en los pasos d) y e) para calibrar la función del tiempo y la retracción hidráulica última, respectivamente.
- d) Calibración de la función del tiempo: Si la forma matemática de la función del tiempo es relativamente adecuada, es posible mejorarla mediante la determinación de un factor de calibración que ajuste las curvas estimadas a los resultados experimentales y de esa forma extrapolar posteriormente la retracción hidráulica de largo plazo del hormigón analizado. La calibración propuesta de la función del tiempo de los modelos a los datos medidos, se basa en la normalización de las curvas de evolución. El proceso de normalización consiste en expresar la función del tiempo de cada modelo y de los resultados experimentales de cada uno de los hormigones ensayados como el cociente entre el valor a cada edad y el valor predicho y resultado medido correspondientes a la mayor edad de medición disponible. Por lo tanto, la función del tiempo calibrada  $f''(t, t_0)$  se obtiene modificando la ecuación original  $f'(t, t_0)$  de modo que se cumpla:

$$\frac{f'(t, t_0)}{f'(t_d, t_0)} = \frac{\varepsilon_{sh}(t, t_0)}{\varepsilon_{sh}(t_d, t_0)} \quad (2)$$

donde  $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$  y  $\varepsilon_{sh}(t_d, t_0)$  son los resultados de retracción hidráulica medidos a los tiempos de secado  $(t-t_0)$  y  $(t_d-t_0)$ , respectivamente, y  $t_d$  es la edad del hormigón correspondiente a la última medición de retracción disponible. Asimismo,  $f''(t, t_0)$  y  $f''(t_d, t_0)$  representan el valor de la función del tiempo calibrada, a los tiempos de secado  $(t-t_0)$  y  $(t_d-t_0)$ , respectivamente.

Para optimizar la función de tiempo mediante la minimización de la suma de los cuadrados de los errores, se recomienda aplicar la técnica de ponderación de resultados propuesta por Bazant y Baweja (1995c), para evitar el efecto del número de resultados disponibles, por edad, en la calibración.

- e) Calibración de la retracción hidráulica última: Una vez calibrada la función del tiempo, el siguiente paso es calibrar la ecuación de retracción hidráulica última. Para este efecto y debido a que no se cuenta experimentalmente con la magnitud de esta deformación, se puede extrapolar su valor a partir de la última medición disponible de retracción hidráulica a la edad  $(t_d-t_0)$  y el valor de la nueva ecuación de evolución calibrada evaluada a la misma edad, de manera que:

$$\varepsilon_{sh,\infty}^e = \frac{\varepsilon_{sh}(t_d, t_0)}{f'(t_d, t_0)} \quad (3)$$

Con los resultados extrapolados determinados con la ecuación 3, se puede calibrar la ecuación de retracción hidráulica última propuesta por el modelo incluyéndole un factor  $K_G$  que corrija su valor a las condiciones locales, de manera que:

$$\varepsilon'_{sh,\infty} = \varepsilon_{sh,\infty}^e = K_G \varepsilon'_{sh,\infty} \quad (4)$$

Por lo tanto, el modelo de predicción de la retracción hidráulica del hormigón calibrado a condiciones locales viene dado por:

$$\varepsilon_{sh}''(t, t_0) = \prod_{i=1}^n K_i f''(t, t_0) \varepsilon_{sh,\infty}'' \quad (5)$$

#### 4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para analizar y calibrar las ecuaciones que componen los modelos de predicción, se diseñó un programa experimental que consistió en la fabricación y ensayo de 8 mezclas diferentes de hormigón, cuatro con cemento Portland y cuatro con cemento Portland Puzolánico y se replicaron todos los ensayos para este último caso. Se incluyó hormigones con cemento Portland, como control de esta investigación, pues la mayoría de los ensayos de retracción en los que se basan los modelos existentes son con hormigones con cemento Portland. Las variables utilizadas en el estudio fueron elegidas para representar los hormigones más comúnmente especificados y usados en el país. Por lo tanto, el énfasis principal fue dado a hormigones con cemento Portland Puzolánico con resistencia característica a compresión cúbica entre 30 y 40 MPa y con asentamiento de cono de Abrams entre 6 y 12 cm. El factorial completo de hormigones ensayados y su designación se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Factorial del Experimento**

Tipo de Hormigón	H35							
Tiempo de curado	7 días							
Clase de cemento	Portland				Portland Puzolánico			
Cono (cm)	6		12		6		12	
Tamaño máximo del árido (mm)	20	40	20	40	20	40	20	40
Identificación	P-20/6-1	P-40/6-1	P-20/12-1	P-40/12-1	PP-20/6-1 PP-20/6-2	PP-40/6-1 PP-40/6-2	PP-20/12-1 PP-20/12-2	PP-40/12-1 PP-40/12-2

##### 4.1 Materiales utilizados

Para fabricar los hormigones de prueba se utilizó una mezcla de cementos, en iguales proporciones, de dos fábricas de cemento nacionales. Los resultados del ensayo de las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla utilizada se muestran en la Tabla 2, junto con la media de las propiedades químicas informadas por los fabricantes. Con los resultados de la Tabla 2, el cemento Portland fue clasificado como Tipo III y R, y el cemento Portland Puzolánico como Tipo IP y N, según las clasificaciones dadas por ASTM (2000a) y CEB (1993), respectivamente.

Las propiedades de los áridos utilizados se indican en la Tabla 3 (ASTM, 2000b). Los áridos se combinaron para ajustarse entre las curvas granulométricas N°2 y N°3 de la Road Note N°4 (Road Research Laboratory, 1950), para tamaño máximo del árido de 20 y 40 mm.

**Tabla 2. Propiedades de los Cementos**

Propiedades Físicas	Cemento		Propiedades Mecánicas	Cemento	
	Portland	Portland Puzolánico		Portland	Portland Puzolánico
Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	3.074	2.867	<b>Resistencia a flexotracción (MPa) a:</b>		
Finura Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3.210	4.233	7 días	6,1	3,2
Agua de consistencia normal (cm <sup>3</sup> )	29,2	34,4	28 días	8,9	6,6
Tiempo de fraguado inicial (hh:mm)	3:10	4:15	<b>Resistencia a Compresión (MPa) a</b>		
Tiempo de fraguado final (hh:mm)	4:00	5:15	7 días	27,8	12,9
Contenido de puzolana (%)	0	28,9	28 días	45,9	29,2
Propiedades Químicas			C <sub>3</sub> S	53,0	-
Residuo insoluble (%)	1,3	26,7	C <sub>2</sub> S	22,0	-
Pérdida en encendido (%)	1,9	3,2	C <sub>3</sub> A	7,9	-
SO <sub>3</sub> (%)	2,2	2,7	C <sub>4</sub> AF	8,8	-

**Tabla 3. Propiedades de los Aridos**

Propiedad	Grava	Gravilla	Arena Gruesa	Arena Fina
Tipo	Silíceo	Silíceo	Silíceo	Silíceo
Forma	Chancado	Chancado	Chancado	Rodado
Tamaño máximo (mm)	40	20	10	5
Densidad SSS (kg/m <sup>3</sup> )	2.722	2.717	2.679	2.629
Densidad Seca (kg/m <sup>3</sup> )	1.651	1.623	1.780	1.657
Absorción (%)	0,9	1,01	0,95	1,59
Huecos (%)	39,4	40,3	33,5	37,0
Coefficiente Volumétrico	0,23	0,27	-	-
Número de Angularidad	6,4	7,3	0,5	4,0
Módulo de Finura	7,99	6,42	3,39	2,33
<b>Proporción de áridos en la mezcla (%) para tamaño máximo del árido de:</b>				
20 mm	-	63	22	15
40 mm	37	28	23	12

#### 4.2. Fabricación y Ensayos del Hormigón Fresco

La fabricación de los hormigones de prueba se realizó según el procedimiento descrito en ASTM C192 (ASTM, 2000b), y se utilizó una betonera de eje vertical marca Zyclos de 0,25 m<sup>3</sup> de capacidad. Se realizaron los siguientes ensayos del hormigón fresco (ASTM, 2000b): asentamiento de cono de Abrams según ASTM C143 y densidad según ASTM C138.

Las hormigones se diseñaron para una resistencia característica a compresión cúbica a los 28 días de 35 MPa, con 10 % de defectuosos y una desviación estándar de 4 MPa. Las dosificaciones y propiedades en estado fresco de los hormigones fabricados se muestran en la Tabla 4.

**Tabla 4. Dosificación y Propiedades en Estado Fresco de los Hormigones Experimentales**

Identificación	Dosificación			Propiedades en Estado Fresco		
	Dosis Cemento (kg/m <sup>3</sup> )	Dosis agua (kg/m <sup>3</sup> )	Dosis de árido (kg/m <sup>3</sup> )	W/C	Asentamiento de Cono (cm)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
P-20/6-1	291	168	1.967	0,577	5	2.426
P-40/6-1	287	167	2.036	0,582	5	2.490
P-20/12-1	344	190	1.930	0,552	10,5	2.464
P-40/12-1	309	173	1.996	0,560	11,0	2.478
PP-20/6-1	415	192	1.809	0,463	5	2.416
PP-20/6-2	416	194	1.811	0,466	6,5	2.421

PP-40/6-1	411	178	1.863	0,433	5,5	2.452
PP-40/6-2	409	193	1.820	0,472	6	2.422
PP-20/12-1	482	208	1.715	0,432	10,5	2.405
PP-20/12-2	482	226	1.713	0,469	12,5	2.421
PP-40/12-1	476	195	1.755	0,410	11,5	2.426
PP-40/12-2	476	208	1.756	0,437	11	2.440

De cada amasada de hormigón se confeccionaron 2 probetas cúbicas de 20 cm, 18 probetas cilíndricas de 15 cm y 6 prismas para los diferentes ensayos a realizar en el hormigón endurecido.

#### 4.3 Propiedades Mecánicas y Retracción Hidráulica del Hormigón Endurecido

Se realizaron los siguientes ensayos del hormigón endurecido: resistencia a compresión cúbica ( $f_{cu,28}$ ) a 28 días de edad según NCh 1037 (NCh 1037; INN, 1977) y resistencia a compresión cilíndrica ( $f_{cil,t}$ ) a 7, 28 y 90 días, módulo de elasticidad ( $E_t$ ) a 7, 28 y 90 días y resistencia al hendidamiento ( $f_{sp,t}$ ) a 7, 28 y 90 días según ASTM C39, C469 y C496, respectivamente (ASTM, 2000b). Todas las muestras fueron mantenidas en curado normalizado ( $T=20\pm 3$  °C y  $HR>90\%$ ) hasta la edad correspondiente de ensayo. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 5. Propiedades Mecánicas de los Hormigones de Prueba (MPa)**

Identificación	$f_{cu,28}$	$f_{cil,7}$	$f_{cil,28}$	$f_{cil,90}$	$E_7$	$E_{28}$	$E_{90}$	$f_{sp,7}$	$f_{sp,28}$	$f_{sp,90}$
P-20/6-1	33,1	24,4	34,3	39,2	22.670,3	25.784,1	28.697,0	2,35	2,85	3,55
P-40/6-1	40,2	28,6	38,2	45,1	22.783,2	29.296,4	30.258,0	2,55	3,40	3,95
P-20/12-1	38,9	26,4	34,4	41,7	20.135,8	25.502,7	29.647,0	2,25	2,70	3,60
P-40/12-1	39,5	25,4	34,9	38,4	21.343,3	26.055,4	27.654,0	2,05	2,55	3,60
PP-20/6-1	43,0	24,1	37,9	45,8	23.270,4	25.646,5	30.790,6	2,25	3,25	3,85
PP-20/6-2	41,3	25,1	34,8	42,4	23.021,0	26.739,9	30.381,3	2,20	2,85	3,55
PP-40/6-1	44,9	25,6	38,9	43,8	24.202,7	27.449,5	31.062,1	2,35	2,80	3,55
PP-40/6-2	41,3	25,1	37,5	44,2	23.516,7	25.190,9	31.361,3	2,30	3,05	3,10
PP-20/12-1	35,6	24,7	32,4	40,4	20.940,9	24.460,7	28.459,2	2,20	2,95	3,55
PP-20/12-2	34,5	22,9	31,4	39,9	22.958,9	24.125,1	28.766,8	2,25	2,70	3,20
PP-40/12-1	37,0	24,3	33,2	41,2	21.539,8	25.097,5	29.921,3	2,15	3,00	3,80
PP-40/12-2	41,0	25,8	34,8	43,9	23.688,7	25.558,7	29.042,4	2,45	2,70	3,05

La retracción hidráulica del hormigón se midió en prismas de dos diferentes dimensiones, para analizar la influencia de las dimensiones, caracterizada por la razón volumen a superficie, V/S, en la evolución y magnitud de la retracción hidráulica. Se utilizaron 3 prismas de 100x100x500 mm y 3 prismas de 75x75x285 mm por cada hormigón estudiado y el ensayo se ejecutó según ASTM C157 (ASTM, 2000b). Una vez fabricadas las probetas, se mantuvieron en cámara húmeda hasta desmoldarlas después de 24 hrs y luego se curaron por inmersión en agua saturada con cal por 6 días más. Posteriormente las probetas fueron almacenadas en cámara de secado a temperatura de  $23\pm 2$ °C y humedad relativa de  $50\pm 4\%$ , midiéndoles la retracción hidráulica a distintas edades hasta un tiempo de 448 días. Los resultados promedio de la retracción hidráulica obtenida en las diferentes probetas se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6. Retracción Hidráulica Medida a Diferentes Tiempos de Secado (mm/m)**

Identificación del hormigón	Probeta (mm)	$\epsilon_{sh,1}$	$\epsilon_{sh,2}$	$\epsilon_{sh,5}$	$\epsilon_{sh,7}$	$\epsilon_{sh,14}$	$\epsilon_{sh,28}$	$\epsilon_{sh,56}$	$\epsilon_{sh,83}$	$\epsilon_{sh,112}$	$\epsilon_{sh,224}$	$\epsilon_{sh,360}$	$\epsilon_{sh,448}$
-----------------------------	--------------	-------------------	-------------------	-------------------	-------------------	--------------------	--------------------	--------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------	---------------------

<b>P-20/6-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0649	0,0837	0,1560	0,1926	0,2659	0,4380	0,6024	0,7054	0,7774	0,8806	0,9179	0,9299
	<b>75x75x285</b>	0,0860	0,1153	0,1720	0,2180	0,3573	0,5373	0,7200	0,7520	0,8147	0,8153	0,8467	0,8747
<b>P-40/6-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0768	0,0938	0,1525	0,1888	0,2514	0,3779	0,5199	0,6150	0,6759	0,7877	0,8226	0,8328
	<b>75x75x285</b>	0,0880	0,1093	0,1613	0,1967	0,2940	0,4280	0,5900	0,6140	0,6780	0,6887	0,7587	0,7840
<b>P-20/12-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0402	0,0583	0,0935	0,1192	0,1837	0,4174	0,5371	0,6362	0,7243	0,8473	0,8723	0,8806
	<b>75x75x285</b>	0,0687	0,0947	0,1947	0,2367	0,3673	0,5615	0,6927	0,7673	0,8547	0,8860	0,9067	0,9253
<b>P-40/12-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0364	0,0375	0,0556	0,0616	0,1435	0,3333	0,4498	0,5534	0,6096	0,7020	0,7404	0,7685
	<b>75x75x285</b>	0,0390	0,0880	0,1270	0,1930	0,2570	0,4420	0,5490	0,6120	0,6770	0,7240	0,7360	0,7800
<b>PP-20/6-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0766	0,1029	0,1252	0,1949	0,3161	0,4681	0,6400	0,7141	0,7877	0,9248	0,9676	0,9670
	<b>75x75x285</b>	0,1407	0,1607	0,2633	0,3147	0,4660	0,5620	0,6973	0,7660	0,8233	0,8933	0,9700	0,9740
<b>PP-20/6-2</b>	<b>100x100x500</b>	0,0362	0,0777	0,1601	0,1897	0,3154	0,5004	0,6382	0,8379	0,8384	0,9536	0,9893	0,9889
	<b>75x75x285</b>	0,1113	0,1187	0,2607	0,3127	0,4913	0,7253	0,8967	0,9620	0,9700	1,0087	1,0340	1,0513
<b>PP-40/6-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0629	0,0902	0,0828	0,1431	0,2618	0,3871	0,4864	0,5362	0,6475	0,7708	0,8005	0,8016
	<b>75x75x285</b>	0,1120	0,1373	0,2627	0,2973	0,4347	0,5200	0,6053	0,6500	0,7000	0,7707	0,7620	0,7907
<b>PP-40/6-2</b>	<b>100x100x500</b>	0,0533	0,0797	0,1592	0,1978	0,3020	0,4911	0,6159	0,8007	0,8145	0,8879	0,9082	0,9118
	<b>75x75x285</b>	0,0800	0,1360	0,2880	0,3320	0,5240	0,6720	0,8160	0,9040	0,8960	0,9360	0,9600	0,9840
<b>PP-20/12-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0688	0,0793	0,1509	0,1793	0,2612	0,5556	0,7194	0,8246	0,9038	1,0147	1,0669	1,0746
	<b>75x75x285</b>	0,0753	0,1207	0,2153	0,2693	0,4453	0,7000	0,8593	0,9333	1,0180	1,0760	1,0840	1,1320
<b>PP-20/12-2</b>	<b>100x100x500</b>	0,0328	0,0596	0,1654	0,2793	0,4554	0,6230	0,8187	0,9333	0,9824	0,9873	1,0078	1,0495
	<b>75x75x285</b>	0,0573	0,0940	0,2207	0,2720	0,4633	0,7080	0,9213	1,0353	1,0647	1,2273	1,2287	1,2307
<b>PP-40/12-1</b>	<b>100x100x500</b>	0,0417	0,0480	0,0795	0,0810	0,1455	0,4072	0,5315	0,6129	0,6830	0,7708	0,7978	0,8141
	<b>75x75x285</b>	0,0567	0,0907	0,1960	0,2493	0,4053	0,6293	0,7553	0,8313	0,9080	0,9400	0,9753	0,9860
<b>PP-40/12-2</b>	<b>100x100x500</b>	0,0301	0,0480	0,1592	0,2431	0,3846	0,5040	0,6462	0,7310	0,7634	0,8243	0,8774	0,8866
	<b>75x75x285</b>	0,0760	0,1080	0,2113	0,2820	0,4420	0,6333	0,8053	0,8900	0,9607	0,9667	1,0073	1,0193

## 5 ANALISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Comparación entre Retracción Hidráulica Medida y Estimada por Modelos de Predicción



La retracción hidráulica medida en el programa experimental fue comparada con el valor calculado con los modelos, para cada uno de los hormigones ensayados, y sus resultados se muestran en la Figura 1. Para efectuar la estimación con los modelos que requieren la variable clase de cemento, se consideró un factor igual a 1 en los cementos Portland Puzolánico, debido a que los modelos no fueron desarrollados para este tipo de cemento y, por lo tanto, no incluyen información sobre el factor que debe ser utilizado. La excepción fue el modelo CEB, donde se utilizó el factor 5 recomendado para cementos de endurecimiento normal y rápido. Para el factor de corrección por humedad relativa se utilizó la ecuación de cada modelo evaluada a HR = 50%.

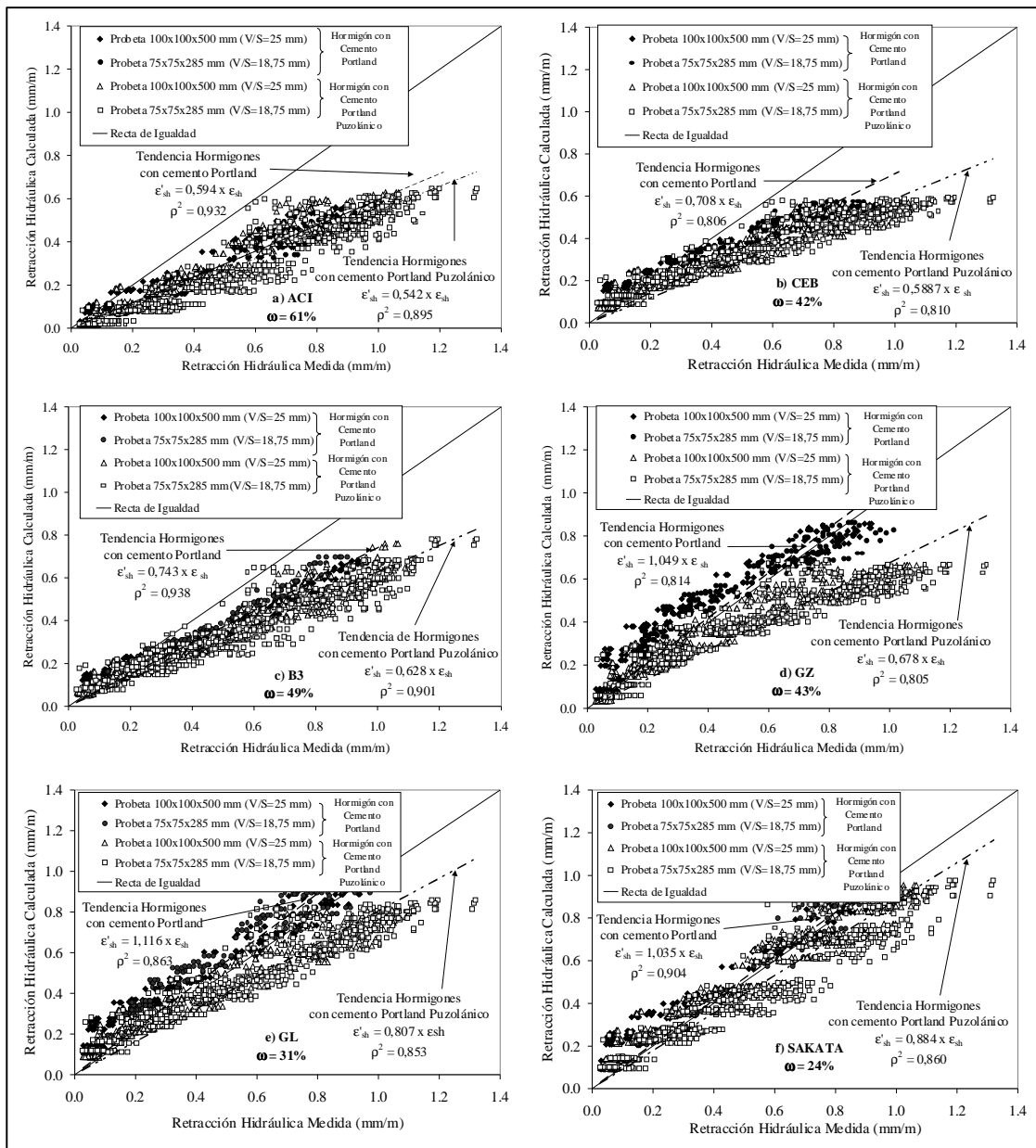
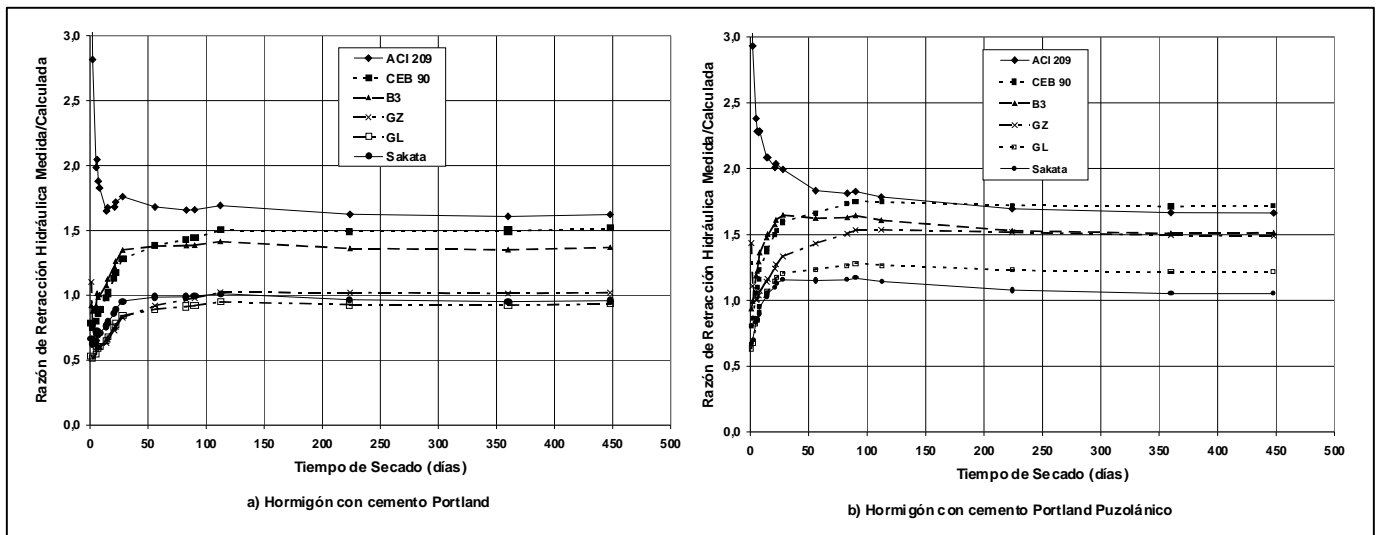


Figura 1. Comparación entre la retracción hidráulica medida y calculada con varios modelos de predicción

En la Figura 1 se aprecia que en general los modelos de predicción considerados subestiman la magnitud de la retracción hidráulica en el tiempo, principalmente para los hormigones con cemento Portland Puzolánico. Esto se concluye de la diferencia que presentan los resultados con la línea de pendiente 1, que indica igualdad entre resultados medidos y calculados con los modelos. Se debe hacer notar que esta tendencia, según muchos miembros del Comité ACI 209, parecería ser universal en la actualidad y no sólo una condición de los cementos chilenos, pues los cementos han cambiado mucho con respecto a los cementos usados en los ensayos en que se basaron los modelos desarrollados. Además, el uso de puzolanas como material cementante se ha generalizado y es así como los documentos ACI 318 y ACI 301 usan el término “razón agua - material cementante” en lugar de “agua - cemento”.

Sin embargo, también se puede apreciar que para los hormigones con cemento Portland, los modelos GZ (Gardner y Zhao, 1993), GL (Gardner y Lockman, 2000) y Sakata (1993) dan una buena estimación de la retracción hidráulica hasta el tiempo de secado considerado en el programa experimental, mientras que todos los otros modelos subestiman su magnitud. Los resultados también muestra que existen diferencias significativas entre la función de tiempo, la ecuación de retracción hidráulica última y los factores de corrección que incluye cada modelo para efectuar la estimación. Además, se puede concluir que si se asume que para propósitos de diseño el coeficiente de variación  $\omega$  calculado según Bazant y Baweja (1995b) debe ser menor que 30%, entonces el único modelo que cumple con esta condición sería el modelo de Sakata (1993).

Para analizar las diferencias entre el valor calculado con los modelos y los resultados medidos, en la Figura 2 se muestra el efecto que tiene el tiempo de secado. De ella se puede concluir que a partir de aproximadamente 100 días de secado, las diferencias se mantienen aproximadamente constantes. Por lo tanto, la calibración de los modelos para estimar la retracción a largo plazo consistiría en multiplicar la ecuación general de cada modelo por el factor que se muestra en el eje de las ordenadas de la Figura 2, lo cual solo corregiría la estimación sobre los 100 días, pero a edades inferiores esta solución no representaría el comportamiento observado. Por lo tanto, se concluye que la función de evolución de los modelos estudiados es deficiente y debe ser calibrada.



**Figura 2. Cuociente entre la retracción hidráulica medida y calculada y su variación con el tiempo de secado**

Al comparar los dos gráficos mostrados en la Figura 2, se aprecia que existen diferencias en la evolución y magnitud de la retracción hidráulica de hormigones fabricados con cemento Portland y Portland Puzolánico. Para visualizar mejor este efecto, la Figura 3 muestra el cuociente entre la retracción hidráulica medida en hormigones de similar resistencia fabricados con cemento Portland Puzolánico y Portland, a igualdad de cono y tamaño máximo del árido. En la figura se puede apreciar que los hormigones con cemento Portland Puzolánico tendrían en promedio una retracción aproximadamente 25 % mayor que la retracción de hormigones con cemento Portland, diferencia que tendería a ir disminuyendo levemente con el tiempo de secado.

Los resultados también indican que el tiempo al cual el hormigón con cemento Portland Puzolánico comienza a aproximarse al valor de retracción hidráulica última es menor que en hormigones con cemento Portland. Mehta (1987) atribuye este hecho a que la acción de la puzolana hace que los hormigones fabricados con estos cementos sean más impermeables en el largo plazo, por lo cual detendrían su proceso de secado antes que en hormigones con cemento Portland.

Por otro lado, al analizar el efecto de la dimensión de la probeta en la retracción hidráulica, se comprobó que su efecto en la magnitud tiende a desaparecer en el largo plazo, lo cual se cumpliría aproximadamente a partir de los 112 días de secado en hormigones con cemento Portland. Para los hormigones con cemento Portland Puzolánico este efecto no se aprecia hasta el tiempo de 448 días de secado considerado en esta investigación, pero se nota también una disminución de la diferencia entre la retracción hidráulica de las distintas probetas. Este hecho fue planteado y demostrado por Hansen y Mattock (1966) y se cumpliría para los hormigones fabricados con cementos Chilenos.

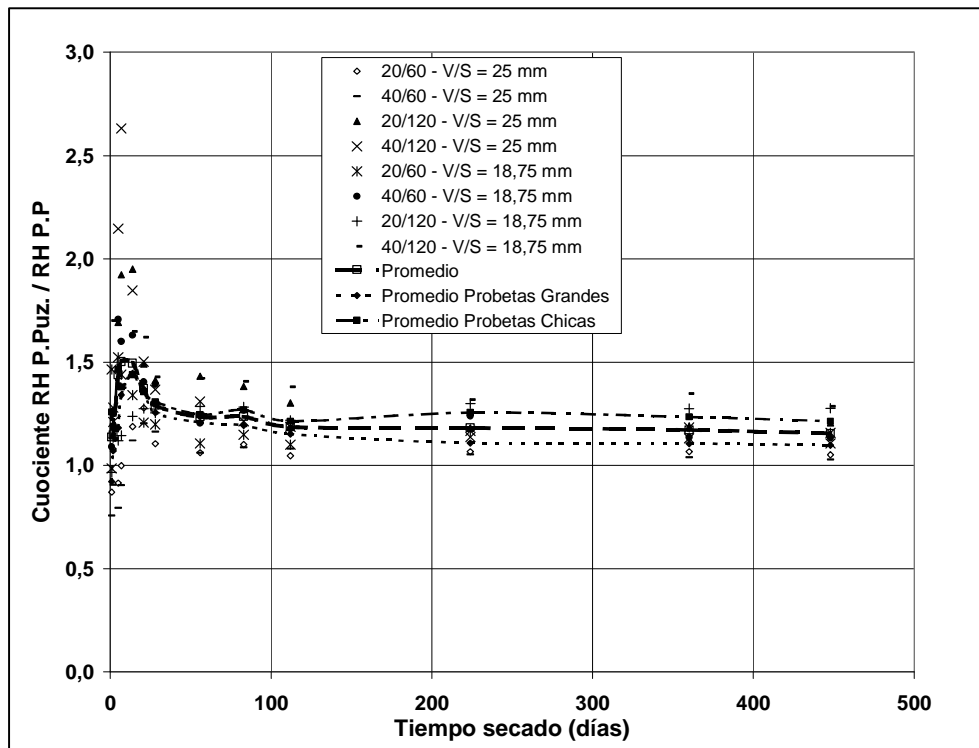


Figura 3. Cuociente entre la retracción hidráulica medida en hormigones con cemento Portland Puzolánico y Portland

### 5.2 Calibración de la Función del Tiempo de la Retracción Hidráulica a Condiciones Locales

Debido a las conclusiones obtenidas en la comparación de los resultados medidos y calculados, se efectuó la calibración a condiciones locales de los modelos. Se calibró primero la función de evolución de la retracción hidráulica considerando el efecto de la clase de cemento. Los factores obtenidos se muestran en la Tabla 7.

De la Tabla 7 se puede concluir que los factores propuestos permitirían un mejor ajuste de las ecuaciones originales a los resultados medidos, teniendo una media de error estándar de 0,057 mm/m para un 95% de nivel de confianza.

**Tabla 7. Factores de Calibración  $K_c$  para la Función del Tiempo de la Retracción Hidráulica de los Modelos en Estudio**

Modelos y funciones de evolución de la retracción hidráulica	Clase de Cemento					
	Portland			Portland Puzolánico		
	$K_c$	Coefficiente correlación (%)	Error estándar (mm/m)	$K_c$	Coefficiente correlación (%)	Error estándar (mm/m)
ACI: $f'(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{K_c \times k_{fc} + (t - t_0)} \right]$	0,85	97,37	0,0563	0,67	97,39	0,056
CEB: $f'(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{K_c \times 0,035 \times (2 \times V/S)^2 + (t - t_0)} \right]^{1/2}$	1,70	97,33	0,0570	1,27	96,82	0,063
B3: $f'(t, t_0) = \tanh \left( \frac{(t - t_0)}{K_c \times \tau_{sh}} \right)^{1/2}$	1,19	97,79	0,0522	0,93	97,33	0,0574
GZ: $f'(t, t_0) = \left[ \frac{7,27 \times \ln(t - t_0)}{17,18} \right] \times \left[ \frac{(t - t_0)}{K_c \times 0,015 \times (V/S)^2 + (t - t_0)} \right]$	2,3	98,6	0,042	1,67	98,08	0,049
GL: $f'(t, t_0) = \left[ \frac{(t - t_0)}{K_c \times 0,15 \times (V/S)^2 + (t - t_0)} \right]^{1/2}$	1,70	97,33	0,057	1,27	96,82	0,063
Sakata: $f'(t, t_0) = \left[ 1 - \exp(-0,108 \times (t - t_0))^{(K_c \times 0,56)} \right]$	1,00	92,20	0,0685	1,08	96,79	0,0632

Además, los valores del factor de calibración  $K_c$  confirman los resultados mostrados en la Figura 3, que indican que la retracción hidráulica en hormigones con cemento Portland Puzolánico se desarrolla más rápidamente que en los hormigones con cemento Portland, hecho atribuible en este caso a la diferente forma de hidratación de ambos cementos.

### 5.3 Calibración de la Ecuación de Retracción Hidráulica Última a Condiciones Locales

Similarmente, se efectuó la calibración de la ecuación de retracción hidráulica última con los valores extrapolados con la ecuación 3 y sus resultados se muestran en la Tabla 8.

La Tabla 8 muestra que en general los factores de calibración modifican la estimación original en sobre 10%, a excepción del modelo Sakata cuya estimación prácticamente no sería modificada, lo cual se concluye para ambos tipos de cemento utilizados en la presente investigación. Sin embargo, los resultados estadísticos indican que la retracción hidráulica última estimada tiene un error

estándar que varía en el rango de 0,072 a 0,1497 mm/m. Además, las ecuaciones tienen un muy bajo coeficiente de correlación, lo que indicaría que las variables consideradas en los modelos no son completamente significativas o que deben ser incluidas nuevas variables en la ecuación de retracción hidráulica última.

**Tabla 8. Factores de Calibración  $K_G$  para la Ecuación de Retracción Hidráulica Última de los Modelos a Condiciones Locales ( $\epsilon''_{sh,\infty} = K_G \times \epsilon'_{sh,\infty}$ )**

Modelo	Clase de cemento					
	Portland			Portland Puzolánico		
	$K_G$	Coefficiente de Correlación (%)	Error estándar (mm/m)	$K_G$	Coefficiente de Correlación (%)	Error estándar (mm/m)
ACI	1,82	0,00	0,0830	1,92	18,14	0,1188
CEB	1,62	10,33	0,0720	1,82	24,08	0,1116
B3	1,36	0,00	0,0858	1,43	46,05	0,0905
GZ	1,38	6,32	0,1005	1,55	13,37	0,1497
GL	1,11	11,65	0,0966	1,25	28,12	0,1086
Sakata	0,95	0,00	0,0843	1,00	31,00	0,1050

#### 5.4. Verificación de la Calibración de Modelos a Condiciones Locales

Los resultados de la calibración efectuada se muestran gráficamente en la Figura 4, en donde se puede apreciar que a pesar de esta corrección, la mayoría de los modelos continúa presentando un problema en la evolución de la retracción hidráulica, ya que la sobreestiman en el corto plazo y las tendencias indicarían que la subestiman en el largo plazo. Sin embargo, los resultados obtenidos para el coeficiente de variación ( $\omega$ ) son todos menores a 30%, lo cual indica que la estimación ha mejorado y ya estaría dentro de los límites aceptables de error.

Por lo tanto, los factores de calibración calculados serían adecuados para corregir los modelos de predicción de la retracción hidráulica a las condiciones de los materiales típicamente utilizados en la fabricación de hormigón en la zona central de Chile, hasta al menos 448 días de secado.

#### 5.5. Tiempo Mínimo de Ensayo para Efectuar la Calibración de Modelos con Resultados de Corto Plazo

Para aplicación práctica de los modelos de predicción en proyectos de construcción, la ingeniería de materiales requiere información confiable para la toma de decisiones, lo que significa que se deben realizar ensayos en el material. Sin embargo, el tiempo de ensayo requerido para efectuar una calibración de los modelos para predecir adecuadamente la retracción hidráulica en casos particulares, puede ser demasiado largo en comparación con las etapas de diseño o iniciales de construcción, cuando las decisiones deben ser tomadas.

Por lo tanto, se realizó un ejercicio para determinar el tiempo mínimo de ensayo requerido para calibrar adecuadamente un modelo y tener una estimación dentro de los límites aceptables. Como se ha señalado anteriormente, el límite comúnmente especificado para considerar una estimación de retracción hidráulica aceptable es un coeficiente de variación ( $\omega$ ) menor a 30%.

En este ejemplo, la metodología de calibración fue aplicada para calibrar la ecuación original del modelo CEB asumiendo los diferentes tiempos de secado especificados en ASTM C157 (ASTM, 200b) como la última medición de cada una de las series de hormigones ensayados y para las

distintas dimensiones de las probetas utilizadas en los ensayos. Con estos resultados se calculó el coeficiente de variación por el método B3 (Bazant y Baweja, 1995b) entre los resultados medidos y calculados hasta los 448 días de secado, como se muestra en la Figura 5.

Como era de esperarse, en la Figura 5 claramente se muestra que a menor razón V/S del elemento de hormigón, menor es el tiempo mínimo requerido para calibrar el modelo dentro de los límites aceptables de exactitud. Por ejemplo, para prismas de 75x75x285 mm, el tiempo mínimo requerido es de 100 días y para probetas de 100x100x500 mm sería de aproximadamente 170 días.

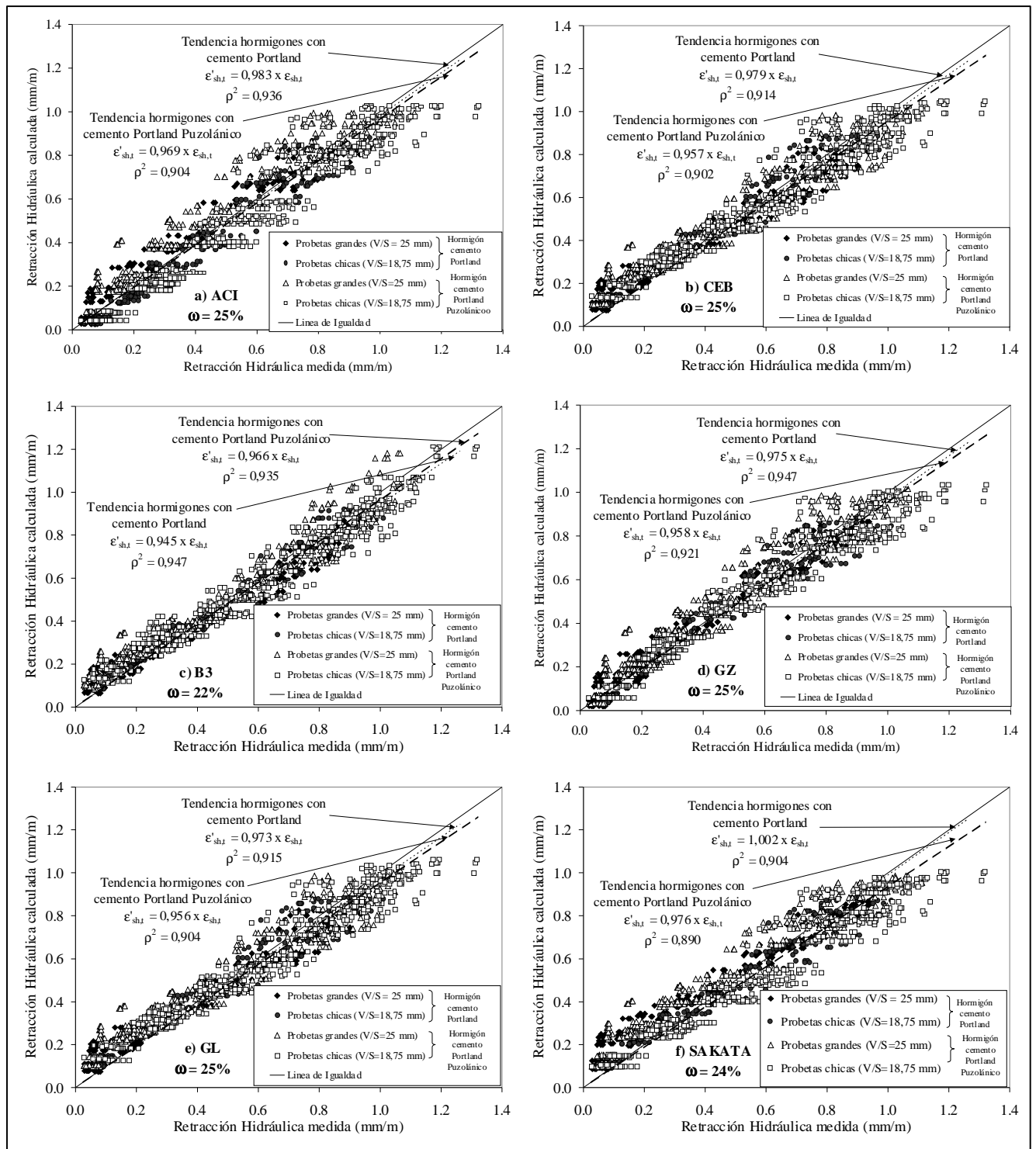


Figura 4. Comparación entre la retracción hidráulica medida y calculada con los modelos calibrados

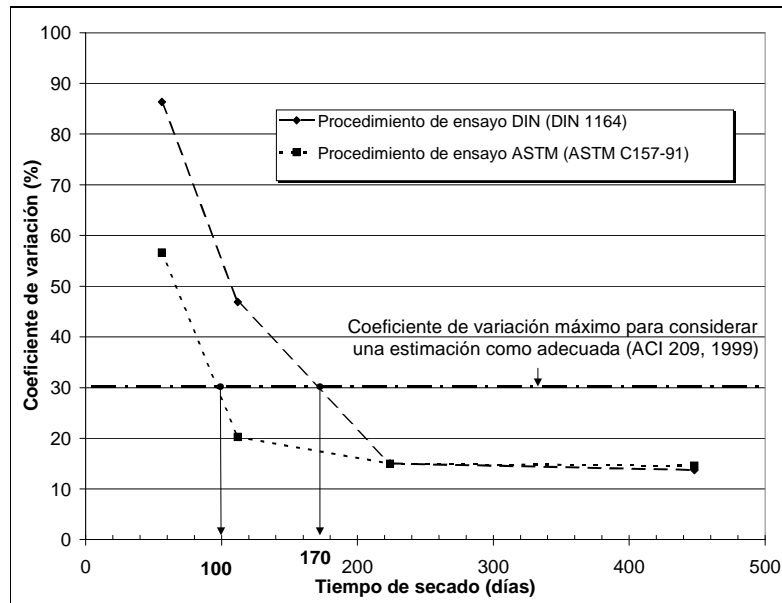


Figura 5. Tiempo mínimo de ensayo requerido para calibrar modelo CEB 1990 (CEB, 1993)

## 6. CONCLUSIONES

- Los modelos de predicción de la retracción hidráulica desarrollados en el extranjero no son capaces de estimar adecuadamente la retracción hidráulica de hormigones fabricados con materiales chilenos. Diferencias principalmente en la clase de cemento y en la naturaleza de los áridos utilizados producen diferencias significativas en la retracción hidráulica de los hormigones fabricados en nuestro país. A tiempos de secado superiores a 90 días, en general todos los modelos subestiman la retracción hidráulica medida en hormigones fabricados con ambos tipos de cemento chilenos, con excepción de los modelos GZ, GL y Sakata que aplicados a hormigones con cemento Portland presentan una estimación adecuada. Para hormigones fabricados con cemento Portland Puzolánico, las retracciones medidas son en promedio 73, 73, 56, 51, 24, y 10% superiores que las estimadas con los modelos ACI 209, CEB 90, B3, GZ, GL y Sakata, respectivamente. A tiempos de secado menores a 90 días la diferencia disminuye y la relación entre retracción hidráulica medida y calculada es variable, debido fundamentalmente a que la función del tiempo de la retracción hidráulica de los hormigones fabricados con cementos chilenos sería diferente a la informada en la bibliografía.
- Los factores de calibración propuestos a los modelos existentes para predecir la retracción hidráulica del hormigón, permiten mejorar considerablemente la estimación de las deformaciones producidas por esta causa en hormigones fabricados con materiales típicos de la zona central de Chile. Con excepción del modelo de Sakata, la calibración disminuye en promedio un 44% el coeficiente de variación de los modelos sin calibrar.
- La retracción hidráulica de hormigones con cemento Portland y Portland Puzolánico es distinta tanto en evolución como en magnitud, encontrándose que hormigones con cemento Portland Puzolánico presentan en promedio una retracción hidráulica 25% mayor que hormigones con cemento Portland, cuando son comparados a igualdad de resistencia a compresión a los 28 días de edad (30 a 40 MPa). Una observación de relevante importancia es que la retracción hidráulica



de hormigones con cemento Portland Puzolánico se desarrolla inicialmente a mayor velocidad y luego se desacelera antes que en hormigones con cemento Portland, probablemente debido al incremento de la impermeabilidad en el tiempo de hormigones con cemento Portland Puzolánico. Este comportamiento observado podría implicar un mayor riesgo de fisuración del hormigón con cemento Portland Puzolánico a edades tempranas.

- d) El tiempo mínimo de ensayo requerido para efectuar la calibración de modelos de predicción de la retracción hidráulica y satisfacer la condición de un coeficiente de variación máximo de 30%, sería de 100 y 170 días al efectuar las mediciones en probetas de 75x75x285 y 100x100x500 mm, respectivamente.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico (Proyecto FONDECYT N°1980943 – 1998) y al Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile por el apoyo financiero dado a este estudio.

## 8. REFERENCIAS

- AL-MANASEER, A. y LAKSHMIKANTAN, S. (1999) Comparison Between Current and Future Design Code Models for Creep and Shrinkage, *Revue Française de Génie Civil*, Vol 3, N° 3-4, pp. 39-59.
- ACI COMMITTEE 209 (1982, reprobado en 1992) Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures. Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, SP-76, American Concrete Institute, Detroit, EE.UU., 1992, pp. 193-300.
- ACI COMMITTEE 209 (1999) Chapter 5: Modeling and Calculation of Shrinkage, Creep and Thermal Expansion, Documento de discusión interna Comité ACI 209-R92, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, EE.UU., 1999.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2000a) Annual Book of ASTM Standards, V. 4.01, Cement; Lime; Gypsum, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., EE.UU.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS (2000b) Annual Book of ASTM Standards, V. 4.02, Concrete and Aggregates, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, Pa., EE.UU.
- BAZANT, Z. y BAWEJA, S. (1995a) Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures - Model B3, *Materials and Structures*, N° 28, pp. 357-365.
- BAZANT, Z. y BAWEJA, S. (1995b) Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage 1. Statistics and Sensitivity. *Materials and Structures*, N° 28, pp. 415-430.
- BAZANT, Z. y BAWEJA, S. (1995c) Justification and Refinements of Model B3 for Concrete Creep and Shrinkage 2. Updating and Theoretical Basis. *Materials and Structures*, N° 28, pp. 488-495.
- CAMPBELL-ALLEN, D. (1997) The Reduction of Cracking in Concrete, The University of Sidney, School of Civil Engineering, Australia, 165 pp.
- CEB (1993) CEB-FIP Model Code for Concrete Structures 1990, *CEB Bulletin d'Information*, N° 213/214, Comité Euro-International du Béton, Thomas Telford, Londres, U.K., 437 pp.

- GARDNER, N.J. y LOCKMAN, M.J. (2000) Compliance, Relaxation and Creep Recovery of Normal Strength Concrete, Documento de discusión interna Comité ACI 209, Agosto 2000, 29 pp.
- GARDNER, N. y ZHAO, J.W. (1993) Creep and Shrinkage Revisited, ACI Materials Journal Vol. 90, N° 3, pp. 236-246.
- HANSEN, T. y MATTOCK, A. (1966) Influence of Size and Shape of Member on the Shrinkage and Creep of Concrete. ACI Journal, Vol. 63, N° 2, pp. 267-290.
- KUTTNER, C.H. (1997) Creep and Shrinkage for Windows the Program for the RILEM Databank, Karlsruhe University, Version 1.0, Weimar, Berlin and Karlsruhe, Germany.
- MASANA, C. (2001) Desarrollo de una Metodología para la Predicción de la Retracción Hidráulica en Hormigones Fabricados con Cementos Chilenos, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- MEHTA, P. (1987) Properties of Concrete Containing Natural Pozzolans, Supplementary Cementing Materials for Concrete, editor V.M. Malhotra, Canadá, pp. 21-30.
- NEVILLE, A.M. (1996) Properties of Concrete, John Wiley and Sons Inc., New York, 844 pp.
- ROAD RESEARCH LABORATORY (1950) "Design of Concrete Mixes", D.S.I.R. Road Note N° 4, H.M.S.O., Londres, U.K., 2<sup>da</sup> edición, 1950, 16 pp.
- SAKATA, K. (1993) Prediction of Concrete Creep and Shrinkage, Proceedings of 5th International RILEM Symposium (Concreep5), Barcelona, Spain, pp. 649-654.

***Carlos Videla***

Ingeniero Civil, Doctor  
Profesor, Departamento de Ingeniería  
y Gestión de la Construcción  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Gerente Area Resistencia de Materiales Dictuc S.A.  
Santiago, Chile

Civil Engineer, Ph.D.  
Assistant Professor, Department of Construction  
Engineering and Management  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Head of Material's Strength Laboratory  
DICTUC S.A.  
Santiago, Chile  
[cvidela@ing.puc.cl](mailto:cvidela@ing.puc.cl)

***Juan Pablo Covarrubias***

Gerente General  
Instituto Chileno del Cemento y el Hormigón  
Santiago, Chile

General Manager  
Chilean Cement and Concrete Institute  
Santiago, Chile  
[jpcovarrubias@ich.cl](mailto:jpcovarrubias@ich.cl)

***Cristian Masana***

Ingeniero Civil, Magister en Ciencia  
de la Ingeniería  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile

Civil Engineer, M.Sc.  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Santiago, Chile  
[cmasana@ing.puc.cl](mailto:cmasana@ing.puc.cl)