

Adecuación de un método de curado acelerado para Hormigones elaborados con cementos Portland CPC40 y áridos de la zona de Concepción del Uruguay

M.I. Schierloh^{1*}, V.C. Rougier², J.D. Sota³

*Autor de Contacto: schierlm@frcu.utn.edu.ar

^{1,2} Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

³ Grupo de Investigación en Ingeniería Civil, Materiales y Ambiente. Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Concordia, Entre Ríos, Argentina.

RESUMEN

En este trabajo, se presenta el procedimiento desarrollado en el proyecto denominado "Predicción de la resistencia del hormigón a los 28 días usando un método acelerado para hormigones con cementos CPC 40, CPF 40 y áridos de la zona", el cual se enfocó inicialmente, en la obtención de un método propio para acelerar el curado del hormigón usando agua en ebullición. En principio se trabajó con hormigones tipo H15 elaborados con Cemento Portland Compuesto (CPC40).

Se comprobó que, totalizando un tiempo entre hormigonado y ensayo de 24 horas, bajando sensiblemente el adoptado en la norma IRAM 1552 de 28,5 horas, se obtuvieron proyecciones de la resistencia con dispersiones que no superaron el 15%, adoptándose este procedimiento como método propio.

Palabras claves: Resistencia a compresión simple; Curado del hormigón; Proyección de resistencia; Curado acelerado del hormigón.

ABSTRAC

In this work, the procedure developed in the project called "Prediction of the resistance of the concrete

at 28 days using an accelerated method for concrete with cement CPC 40, CPF 40 and aggregates of the area" is presented. Aforementioned project, initially focused on obtaining an own method that allows to accelerate the procedure of curing concrete using boiling water. At the beginning of the research project, a concrete with nominal compressive strength of 15 MPa made with Portland Composite Cement (CPC40), was used.

It was found that, dispersions values of compressive strength did not exceed of 15% when a time of 24 hours between casting concrete and testing specimens is considered, Furthermore, the curing time of 28,5 hours adopted by IRAM 1552 was reduced.

Keywords: Simple compressive strength; concrete cured; Resistance projection; Accelerated curing of concrete.

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se o procedimento desenvolvido no projecto denominado "Predição da resistência do concreto aos 28 dias utilizando um método acelerado para concretos com cimentos CPC 40, CPF 40 e granulados da zona", o qual se concentrou inicialmente na obtenção de um método próprio para acelerar a cura do concreto utilizando água em ebulição. Em princípio trabalhou-se com concreto tipo H15 elaborados com Cimento Portland Composto (CPC40).

Verificou-se que, totalizando um tempo entre a concretagem e o ensaio de 24 horas, baixando sensivelmente o tempo adoptado na norma IRAM 1552 de 28,5 horas, se obtiveram projecções da resistência com dispersões que não ultrapassaram 15%, sendo este procedimento adoptado como método próprio.

Palavras chaves: Resistência à compressão simples; Cura do concreto; Projecção de resistência; Cura acelerada do concreto.

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de proyectar, a partir de edades tempranas, la resistencia característica o especificada del hormigón a los 28 días, es un problema permanente de los Ingenieros y técnicos de la construcción, sobre todo en obras de gran envergadura, donde predecir dicha resistencia es fundamental para seguir avanzando con los trabajos.

Los métodos para predecir la resistencia característica o especificada se dividen en dos grupos:

1-Metodo natural.

2-Metodos acelerados.

Este trabajo se centró en el estudio de los Métodos acelerados, ya que al igual que otros autores (Cano Olazábal et al., 1976), se concluyó, en el desarrollo del trabajo precedente (Schierloh et al., 2018), que los valores de resistencia obtenidos en ensayos realizados sobre probetas a edades menores de 7 días, curadas con procedimiento natural normalizado, son difícilmente relacionables con los obtenidos a 28 días, debido a la gran dispersión que se produce.

La norma que rige este tipo de ensayos en nuestro país, es la IRAM 1552, de septiembre de 1993 (IRAM1552,1993), que ha quedado desactualizada debido al cambio en la composición química de los cementos actuales.

Estos métodos acelerados, al suministrar calor al hormigón, producen a las pocas horas un aumento de la resistencia respecto del método natural y una menor dispersión a igual tiempo de ensayo.

Lo cual puede deberse a varios factores que se están estudiando, asociados fundamentalmente al aumento de la cinética de las reacciones por acción de la energía calórica adicionada, que resulta en reacciones más uniformes y seguramente mejor correlacionadas por menores intervalos entre las mismas.

A finales de los años 50, se comenzó a estudiar científicamente la predicción de la resistencia del hormigón a los 28 días, partiendo de ensayos a las pocas horas de hormigonado usando métodos acelerados. Estos métodos acelerados se realizaron desde edades que varían de 3 horas luego de producirse el hormigonado, hasta 72 horas después del mismo. Se efectuaron con el hormigón en los moldes o desmoldados y usando agua a diversas temperaturas (35 grados, 60 grados), incluyendo agua en ebullición y vapor de agua.

En la Argentina en los años 70, en los laboratorios LEMIT, realizaron estudios tomando como base los pronósticos de resistencia por métodos acelerados efectuados por distintos investigadores y laboratorios, y considerando la necesidad de contar con un método práctico capaz de obtener resultados con una variación razonable, optaron por el sistema de usar agua en ebullición, luego del desmoldado a las 23 horas. (Cano Olazábal et al., 1976). Dicho método, muy práctico y fácilmente reproducible en obra, permitió obtener valores de resistencia a la edad 28 horas y treinta minutos, los cuales pudieron ser relacionados gráfica y/o analíticamente con los valores de resistencia a compresión del hormigón a los 28 días.

La mayoría de los países, tienen normas específicas respecto de métodos acelerados. Los Estados Unidos la ASTM 684 (ASTM 684, 2003), Perú la NTP 339.213 (NTP 339.213, 2007), Colombia NTC 1513 (NTC1513, 1994), entre otros.

Por otra parte, es sabido que en algunos procedimientos utilizados para acelerar el curado son necesarios equipos sofisticados, sin embargo, se pueden aplicar procedimientos para los cuales se utilizan elementos sencillos y replicables no solo en laboratorio, sino también a pie de obra.

Los estudios sobre métodos de curado acelerados para el hormigón que se han desarrollado hasta el momento en Argentina, fueron realizados para hormigones elaborados con cemento portland normal, muy diferentes a los que actualmente se fabrican en el país.

Partiendo de la revisión realizada (Qi-ling Luo y Wei-Lun Wang, 2011; Quispe Paye, 2017; Barragan et al., 1999) entre otros, se desarrolló en la primera etapa del proyecto, un análisis que consistió en encontrar y ajustar un método propio para el curado acelerado, fácil de reproducir no solo en laboratorios, sino también en campo a pie de obra, que permitió determinar el menor tiempo al que se alcanza una proyección de resistencia a los 28 días aceptable (con dispersiones menores o iguales al 15%, siguiendo las disposiciones del reglamento CIRSOC201 (CIRSOC201:2005).

2. PROCEDIMIENTOS

2.1 Aplicación de la Norma IRAM 1552 y el método desarrollado en LEMIT.

Ante el desconocimiento del mecanismo de acelerar el curado, ensayo y resultado probables del método de agua en ebullición por la falta de experiencia previa, lo primero que se realizó fue aplicar la norma IRAM 1552 y los coeficientes determinados en el trabajo realizado por los investigadores en el LEMIT.

La norma IRAM 1552, establece tres tipos de métodos acelerados. Los que se detallan en la Figura 1, tomada de la norma IRAM 1552:93.

Procedimiento	Moldes	Medio de curado acelerado	Temperatura de curado acelerado °C	Edad del comienzo del curado acelerado	Duración del curado acelerado	Edad de ensayo
A. Agua caliente	reutilizables o para un sólo uso	agua	35	inmediatamente después del moldeo	23½ h ± 30 min	24 h ± 15 min
B. Agua hirviendo	reutilizables o para un sólo uso	agua	hirviendo	23 h ± 15 min después del moldeo	3½ h ± 5 min	28½ h ± 15 min
C. Autógeno	para un sólo uso	calor de hidratación	temperatura inicial del hormigón aumentada por el calor de hidratación	inmediatamente después del moldeo	48 h ± 15 min	49 h ± 15 min

Figura 1. Breve descripción de los procedimientos de curado acelerado. Norma IRAM 1552:1993.

El que se adoptó para aplicar fue el Método B de agua hirviendo, el cual tiene un tiempo de colocación de las probetas en agua hirviendo pasadas las 23 hs ± 15 minutos. El tiempo del curado acelerado es de 3,5 hs ± 5 minutos y un enfriado mínimo de 1 hora, totalizando un tiempo de 28 ½ hs ± 15 minutos para completar el ensayo.

El método empleado por los investigadores en el LEMIT, es similar en cuanto a tiempos, al presentado en la IRAM 1552, que a su vez se ajusta al de la norma ASTM C648(1973), pero con algunas variantes mínimas introducidas por los investigadores. El tiempo de curado acelerado se mantiene en 3,5 horas ± 15 minutos y el tiempo total para la realización del ensayo es de 28 ½ hs ± 15 minutos.

Para ello, se utilizó un equipamiento sencillo (olla y hornalla portátil a gas), y que permitió sumergir las probetas de hormigón en agua en ebullición durante el tiempo que determina el método. Así como también equipamiento de laboratorio (prensa hidráulica, moldes metálicos para probetas, balanzas electrónicas, etc), que posibilitaron la ejecución de los ensayos correspondientes.

El proceso se inició con la elaboración de un pastón de hormigón el cual se vierte en moldes normalizados según norma IRAM 1524(2004). Luego de transcurridas las horas prefijadas se desmoldan y se coloca, las muestras, en agua en ebullición por el tiempo necesario para ajustar la dispersión de los resultados. Se produce el enfriado de las probetas hasta un tiempo y temperatura a determinar y se las ensaya a compresión simple.

El valor obtenido se relaciona con el valor alcanzado con las probetas ensayadas a 28 días curadas de manera normal en cámara húmeda.

Para el trabajo que aquí se presenta, el objetivo central fue ajustar de forma precisa la metodología (tiempo de desmolde, tiempo de hervido y tiempo de enfriamiento necesario de las probetas), a fin

de obtener un “método propio”, de tal manera de alcanzar una predicción de la resistencia a los 28 días aceptable, en el menor tiempo posible.

Para ello se procedió de la siguiente manera:

Inicialmente se caracterizaron los materiales a usar, los resultados se muestran en el Tabla 1, luego se efectuó el cálculo racional del hormigón, que sirvió como testigo para determinar el tiempo de desmolde límite, las horas necesarias de cocción de las probetas, la forma y el tiempo mínimo de enfriado de las probetas.

Tabla 1. Características de los áridos utilizados.

Áridos	IRAM	Densidad relativa gr/cm ³	Abs. de agua %	IRAM 1505		MF de la Mezcla
				Tamaño Máximo mm	Módulo de Finura	
Ar. fina del río Uruguay	1520	2,5	0,7		1,53	5,25
C. Rodado de Ar. Molino	1433	2,56	1,5	19		

Se dosifico un hormigón de tensión característica especificada real H15, relación agua material cementicio 0,5, asentamiento 8 cm, utilizando cemento CPC 40 y áridos de la zona. Tabla 2.

Tabla 2. Diseño racional de mezcla de hormigón H15 por m³

Dosificación H15		
Material	Volúmen	Peso Kg/m ³
Cemento	0,097	300
Agua	0,150	150
Canto Rodado	0,415	1050
Arena	0,338	896
Total	1	2395,7
Relación A/C	0,5	

Como no se tenía experiencia previa, se optó por iniciar aplicando la metodología indicada en la norma IRAM 1552. Para lo cual se desmoldaron las probetas a las 23 horas, se las colocó en agua hirviendo durante 3,5 horas, se las dejó enfriar a temperatura ambiente durante dos (2) horas y a continuación se las ensayo a compresión simple, completando un total de **28½hs**.

Se realizaron 8 series de cuatro probetas cada una. De cada serie ensayada, dos probetas se utilizaron para ser colocarlas en agua en ebullición y posteriormente ensayadas. Las otras dos se dejaron en cámara húmeda con curado normal y ensayadas a los 28 días.

Realizados los ensayos de las ocho series, se determinó la tensión característica o especificada a las 28½ horas y a los 28 días, estableciéndose la relación $\sigma_1/\sigma_{28 \text{ días}}$ (tensión característica o especificada a la hora de cocción respecto de la tensión característica o especificada a los 28 días), en la Figura 2 se muestra el modelo de tabla con los resultados, que no se han transcritos por lo extenso de la misma. Y con las ocho series se determinaron los valores finales que se muestran en el Tabla 3.

Serie	Probetas n°	Edad de Rotura en días	Asentamiento (cm)	Carga rotura (1) (Tn)	Carga rotura (2) (Tn)	Rotura compresión (1) MPa	Rotura compresión (2) MPa	Diferencia (1) (%)	Diferencia (2) (%)	Carga rotura (Tn)	Rotura compresión Mpa	Coefficiente "r" $r = \sigma_{1 \text{ día}} / \sigma_{28 \text{ días}}$
I	1	1	8	12,13	12,36	6,74	6,86	-0,94	0,94	12,25	6,80	0,385973207
	2	28		31,81	31,64	17,66	17,57	0,27	-0,27	31,73	17,62	
II	1	1	7,5	12,4	13,41	6,89	7,45	-3,91	3,91	12,91	7,17	0,390055917
	2	28		32,51	33,66	18,05	18,69	-1,74	1,74	33,09	18,37	
III	1	1	8	11,15	11,73	6,19	6,51	-2,53	2,53	11,44	6,35	0,401544402
	2	28		27,66	29,32	15,36	16,28	-2,91	2,91	28,49	15,82	
IV	1	1	7,5	10,9	11,58	6,05	6,43	-3,02	3,02	11,24	6,24	0,381210785
	2	28		28,16	30,81	15,64	17,11	-4,49	4,49	29,49	16,37	
V	1	1	8	11,24	10,95	6,24	6,08	1,31	-1,31	11,10	6,16	0,387665968
	2	28		26,33	30,91	14,62	17,16	-8,00	8,00	28,62	15,89	
VI	1	1	8	11,09	11,28	6,16	6,26	-0,85	0,85	11,19	6,21	0,362560778
	2	28		31,29	30,41	17,37	16,89	1,43	-1,43	30,85	17,13	
VII	1	1	8	10,67	11,36	5,92	6,31	-3,13	3,13	11,02	6,12	0,407434807
	2	28		26,77	27,3	14,86	15,16	-0,98	0,98	27,04	15,01	
VIII	1	1	7,5	10,69	10,55	5,94	5,86	0,66	-0,66	10,62	5,90	0,379150303
	2	28		28,41	27,61	15,77	15,33	1,43	-1,43	28,01	15,55	

Figura 2. Resultados de los ensayos acelerados de resistencia del Hormigón H15 con CPC40, desmoldado a las 23hs, curado acelerado 3,5hs, enfriamiento y rotura a las 28½hs.

Tabla 3. Valores finales obtenidos al aplicar la metodología de la IRAM 1552

Días de rotura	Tensión media Mpa	Desviación estándar	Factor K (para n-1)	Tensión caract. Mpa	Porcentaje de Res. Caract. respecto de Res. a 28 días	Coefficiente "R" $r = \sigma_{1 \text{ día}} / \sigma_{28 \text{ días}}$
1	6,37	0,41	1,42	5,78	38,93	0,3893
28	16,47	1,14	1,42	14,85	100,01	

La constante estadística "K", depende de dos factores:

a- Del número de ensayos.

b- Del porcentaje aceptable de probetas que caen por debajo de un valor de diseño mínimo.

El ACI y el reglamento Argentino CIRSOC 201:2005 aceptan un 10% de la curva de Gauss. El CEB el 5% de dicha curva.

Para este trabajo se adoptó 90% de la curva de Gauss como cobertura estadística. Para ocho series de ensayos y una cobertura del 90%, $K=1,42$

A continuación, se realizó un análisis estadístico, partiendo del coeficiente $R=0,3893$, resultante para las ocho series ensayadas. Se analizaron las series individualmente, comparando los resultados de los ensayos y los resultados aplicando el coeficiente "R" hallado, se observaron las desviaciones individuales que se producen, las que se presentan en el Tabla 4.

Los valores negativos, indican que los valores de ensayo, son mayores a los valores calculados teóricamente y viceversa.

El coeficiente $R= 0,3893$, es el resultante para las ocho series ensayadas.

Si analizamos las series individualmente, comparando los resultados de los ensayos y lo que debería dar aplicando el coeficiente "R" hallado, podremos observar las desviaciones individuales que se producen.

La Tabla 4, resume este concepto.

Tabla 4. Desviación Individual para las ocho series

Serie	Rotura compresión	$\sigma_{28\text{días}}$ proyectada	Diferencia $\sigma_{28\text{ proy}} - \sigma_{28}$	Diferencia en porcentaje
I	6,8	17,47	-0,15	-0,87
	17,62			
II	7,17	18,42	0,05	0,26
	18,37			
III	6,35	16,31	0,49	3,01
	15,82			
IV	6,24	16,03	-0,34	-2,13
	16,37			
V	6,16	15,82	-0,07	-0,42
	15,89			
VI	6,21	15,95	-1,18	-7,39
	17,13			
VII	6,12	15,72	0,71	4,52
	15,01			
VIII	5,90	15,16	-0,39	-2,60
	15,55			

Por ejemplo, tomando la serie I, se aprecia que a las 28 ½ horas, las probetas rompieron a un valor promedio de 6,8 MPa. Se recuerda que esta rotura representa el valor promedio de dos ensayos.

Aplicando el coeficiente "R", a los 28 días, el valor de ensayo debería ser de 17,47 MPa. En el ensayo a los 28 días, el valor de rotura promedio fue de 17,62 MPa, siendo la diferencia de -0,15 MPa., que expresado en porcentaje respecto del valor teórico de rotura, representa el -0,87 %

Del análisis de los porcentajes de desviación, se observó que individualmente las desviaciones resultaron todas debajo del 15%, siendo la máxima desviación un 7,39%.

El análisis individual, se realizó considerando ensayos individuales y comparando con los índices de las ocho series. Este estudio, sirvió solo a los fines teóricos, pero no se ajusta a los requerimientos de la normativa vigente, ya que éstas consideran requisito mínimo de tres valores individuales para determinar las tensiones características.

Para completar el análisis se planteó la siguiente suposición: un laboratorista podría haber ensayado solo tres series y al azar le hubiesen tocado algunas de estas series, las desviaciones que podrían haber ocurrido se calculan de la siguiente manera:

El número de combinaciones posibles es:

$$C = \frac{n!}{r!} * (n - r)! \quad (1)$$

Siendo:

n = número de series ensayadas (en este caso: 8)

r = número de series parciales (en este caso: 3)

Reemplazando en (1) $C = \frac{8!}{3!} * (8 - 3)! = 56$ combinaciones

Esto indica que una de estas 56 combinaciones posibles es la que determina el mayor desvío posible. La posibilidad de que ello ocurra, es:

$$\% = \frac{1}{56} = 0,01785 = 1,78\% \quad (2)$$

Se tiene entonces el 1,78 % de probabilidades de que ocurra dicho evento.

Se realizaron todas las combinaciones posibles de las 8 series tomadas de a tres, se determinaron las tensiones teóricas a los 28 días y finalmente las diferencias entre esos valores teóricos proyectados y los obtenidos con los ensayos, tanto en valores como en porcentajes. Los valores máximos y mínimos de las desviaciones obtenidas de las 56 combinaciones, así como las series en que se obtuvieron se muestran en el Tabla 5.

Tabla 5. Desviaciones máximas para tres series al azar.

MAXIMOS Y MINIMOS	
Series 1,2,6	-10,71
Series 3,4,7	10,35

Se observó que las desviaciones encontradas, en el escenario más desfavorable posible de tres series al azar no superó el 15%, valor máximo previsto por el reglamento CIRSOC 201:05.

Por otra parte, se comprobó que, al aumentar el número de series para realizar las combinaciones posibles, las desviaciones disminuían. Comprobándose, de esta manera la hipótesis planteada, respecto a que la situación más desfavorable se daría al tomar las series de a tres.

Se realizó a continuación la comparación aplicando las fórmulas dadas por la norma IRAM 1552 y los coeficientes obtenidos en los estudios del LEMIT.

La norma IRAM 1552, da una formula genérica que expresa la correlación entre la resistencia a edad temprana y la resistencia a los 28 días.

La fórmula que lo expresa es una función hiperbólica:

$$Y = X / (A * B + B) \quad (3)$$

Siendo:

Y = Resistencia esperable a compresión del hormigón a los 28 días en megapascales

X = Resistencia a la compresión obtenida del hormigón en ensayo acelerado

A y B = Son coeficientes de correlación que depende del material empleado

La norma no determina valores para A y B , los deja a criterio del investigador en función de los ensayos a realizar en laboratorio para el tipo de cemento y agregados utilizados.

El LEMIT, en sus estudios realizados en los años setenta del siglo pasado, se determinó una formula hiperbólica semejante a la de la norma IRAM 1552, donde los coeficientes A y B , están definidos para ciertos áridos empleados en los estudios.

$$\text{Piedra partida granítica} \quad Y = X/(0,001 * X + 0,39) \quad (4)$$

$$\text{Piedra partida cuarcítica} \quad Y = X/(0,001 * X + 0,37) \quad (5)$$

$$\text{Canto rodado} \quad Y = X/(0,001 * X + 0,41) \quad (6)$$

Para el caso que nos ocupa se usó canto rodado, sería reemplazando en (6):

$$\sigma_{28\text{días}} = 5,78/(0,001 * 5,78 + 0,41)$$

$$\sigma_{28\text{días}} = 13,90\text{MPa}$$

El valor real de ensayo fue: $\sigma_{28\text{días}} = 14,85\text{MPa}$

La diferencia entre ambos valores resultó ser:

$$\text{Dif} = 14,85\text{MPa} - 13,90\text{Mpa} = 0,95\text{Mpa} \quad (7)$$

La diferencia en porcentaje fue:

$$\text{Dif}\% = 0,95 * \frac{100}{13,90} = 6,83\% \quad (8)$$

Esto indicó que hay una diferencia de 6,83 % entre los valores dados por la fórmula del LEMIT para los antiguos cementos Portland normales y el cemento CPC 40.

El objetivo de esta investigación, no fue comparar ambas realidades, ya que para hacerlo habría que tomar un mayor número de series de muestra.

La aplicación de la norma IRAM 1552:93, se utilizó para definir variables para la aplicación del procedimiento, de las cuales las más importantes fueron:

- Tiempo de encendido del quemador usado, hasta que el agua de la olla a temperatura normal alcanza la ebullición (esto depende de la potencia del quemador). (1 h.)
- Temperatura del agua en ebullición, (98,8 °C).
- Temperatura a que desciende el agua una vez colocadas las 4 probetas. (89,3°C).
- Tiempo transcurrido hasta que el agua vuelve a hervir. (15min).
- Temperatura exterior de la probeta una vez sacadas del agua hirviendo (70,2°C).
- Temperatura exterior de la probeta pasados los 30 minutos (48,1°C).
- Temperatura exterior de la probeta luego de una hora, (36,9 °C).
- Tiempo entre la elaboración de pastones, (15 minutos).

2.2 Ensayos con 3hs de hervido.

A fin de evidenciar el efecto de reducir las horas de cocción de las probetas, se llevó a cabo el mismo análisis con otras ocho series, pero colocándolas en agua hirviendo solo por tres (3) horas. Completando un tiempo final de ensayo de 28 horas. Los valores se observan en los Tablas 6, 7 y 8.

En esta oportunidad se comprobó que no era muy marcada la diferencia de dispersiones respecto de la cocción durante 3 ½ horas y las dispersiones obtenidas estuvieron dentro del margen del 15%.

Tabla 6. Valores finales para tres horas de hervido.

Días de rotura	Tensión media Mpa	Desviación estándar	Factor K (para n-1)	Tensión caract. Mpa	Porcentaje de Res. Caract. respecto de Res. a 28 días	Coficiente "R" $r = \sigma_{1\text{día}}/\sigma_{28\text{días}}$
1	6,75	0,31	1,42	6,31	38,14	0,3881
28	17,03	0,54	1,42	16,26	98,26	

Tabla 7. Desviaciones individuales para las series con tres horas de hervido.

Serie	Rotura compresión	$\sigma_{28\text{días}}$ proyectada	Diferencia $\sigma_{28\text{ proy}} - \sigma_{28}$	Diferencia en porcentaje
I	6,74	17,56	0,61	3,46
	16,95			
II	7,03	18,31	0,89	4,87
	17,42			
III	6,72	17,50	0,11	0,65
	17,39			
IV	6,61	17,22	1,30	7,54
	15,92			
V	6,21	16,18	-0,82	-5,09
	17			
VI	7,19	18,73	1,96	10,46
	16,77			
VII	6,55	17,06	0,00	0,01
	17,06			
VIII	6,95	18,10	0,39	2,17
	17,71			

Tabla 8. Desviaciones máximas y mínimas para tres series al azar, en el caso de tres horas de hervido.

MAXIMOS Y MINIMOS	
Series 5,6,7	-13,5
Series 1,3,4	10,27

2.3 Ensayos con desmolde a las 20 horas, tres horas de cocción, media hora de enfriamiento y rotura a las 24 hs – Método Propio -

Observando que, al disminuir media hora la cocción, se producía una mayor dispersión y el tiempo disminuido fue de solo media hora, se optó, entonces, por reducir lo más posible el horario de desmolde y enfriado y no disminuir más el horario de cocción.

El desmolde se lo llevo a 20 horas. La colocación de las probetas en agua en ebullición se realizó a las 20½ horas durante un período de 3 horas y el enfriamiento se lo llevó al mínimo posible de media hora, totalizando un tiempo completo entre elaboración del hormigón y el ensayo a compresión simple de 24 horas, bajando sensiblemente el tiempo adoptado en la norma IRAM 1552 de 28 ½ horas.

Se realizaron nuevamente otras ocho series de probetas, se siguieron los mismos procedimientos y los resultados se resumen en los Tablas 9, 10 y 11 que se muestran a continuación.

Se verificó que la dispersión resultó menor del 15% considerándose el límite que mejor ajustó, adoptándose este sistema como método propio.

Tabla 9. Valores finales obtenidos para el método propio.

Días de rotura	Tensión media Mpa	Desviación estándar	Factor K (para n-1)	Tensión caract. Mpa	Porcentaje de Res. Caract. respecto de Res. a 28 días	Coefficiente "R" $r = \sigma_{1\text{día}}/\sigma_{28\text{días}}$
1	6,24	0,26	1,42	5,87	39,52	0,3905
28	16,04	0,72	1,42	15,03	101,20	

Tabla 10. Desviaciones individuales con tres horas de hervido, en el método propio.

Serie	Rotura compresión	$\sigma_{28\text{días}}$ proyectada	Diferencia $\sigma_{28\text{ proy}} - \sigma_{28}$	Diferencia en porcentaje
I	6,44	16,72	1,67	0,98
	15,05			
II	6,69	17,37	1,96	11,27
	15,41			
III	6,45	16,74	-0,02	-0,09
	16,76			
IV	6,22	16,15	0,89	5,50
	15,26			
V	5,86	15,21	-1,35	-8,86
	16,56			
VI	6,05	15,71	-0,69	-4,42
	16,40			
VII	6,03	15,65	-0,39	-2,46
	16,04			
VIII	5,93	15,39	-1,48	-9,58
	16,87			

Observando los porcentajes de desviación, se advirtió que individualmente las desviaciones están todas debajo del 15%, siendo la máxima de 11,09%.

Este porcentaje, es mayor al 7,39% obtenido con un tiempo de hervido de probetas de 3 ½ horas (método IRAM 1552), pero queda dentro de los límites aceptables.

Esto en principio estaría indicando una posible influencia negativa de media hora menos de cocción, tres horas menos de desmolde y 1 1/2 hora menos de enfriamiento.

Tabla 11. Desviaciones máximas para tres series al azar para un hervido de tres horas, en el método propio.

MAXIMOS Y MINIMOS	
Series 3,5,8	-13,00
Series 1,2,3	12,43

Se observa que las desviaciones encontradas en el escenario más desfavorable posible de tres series al azar no superan el 15%, pero están cercanos a ese límite.

2.4 Ensayos con desmolde a las 20 horas, dos horas de hervido, media hora de enfriamiento y rotura a las 23 hs

Siguiendo con la hipótesis inicial de encontrar un método que llegue a un límite mínimo posible del ensayo en horas, se pensó en disminuir una hora del tiempo de hervido propuesto con el método propio, es decir se bajó el tiempo de hervido a dos horas, dejando constante el tiempo de desmolde, colocación de las probetas en agua hirviendo y enfriamiento, llegando a un total de 23 horas para el ensayo acelerado.

Se realizaron otras ocho series de probetas, repitiendo los análisis.

Los resultados se resumen en los Tablas 12, 13 y 14 que se muestran a continuación.

Tabla 12. Valores finales obtenidos para el método con dos horas de hervido.

Días de rotura	Tensión media Mpa	Desviación estándar	Factor K (para n-1)	Tensión caract. Mpa	Porcentaje de Res. Caract. respecto de Res. a 28 días	Coefficiente "R" $r = \sigma_{1\text{día}}/\sigma_{28\text{días}}$
1	4,82	0,53	1,42	4,06	30,19	0,3020
28	15,58	1,49	1,42	13,46	100,00	

El coeficiente R= 0,3020, es el resultante para las ocho series ensayadas.

Se analizaron las series individualmente, comparando los resultados de los ensayos y lo que debería dar aplicando el coeficiente "R" hallado, en la tabla 14 se observan las desviaciones individuales que se producen.

Observando los porcentajes de desviación, se advierte que individualmente las desviaciones sobrepasan el límite del 15%, siendo la máxima desviación un 16,55%.

Las mayores desviaciones obtenidas de las 56 combinaciones, se observan en la Tabla 14.

Se observa que las desviaciones encontradas en el caso más desfavorable de tres series al azar superan en un 45% los mínimos y en un 18,2% los máximos, respecto del 15%, lo que acentúa lo observado en el análisis anterior.

Se hace evidente que este método no garantiza una desviación aceptable. Por ello se desestima su aplicación y se considera el método ensayado para un total de 24hs, como el límite al que se podía llegar.

Esto muestra una posible influencia negativa de una hora menos de hervido respecto del método propio.

Tabla 13. Desviaciones individuales con dos horas de hervido.

Serie	Rotura compresión	$\sigma_{28\text{días}}$ proyectada	Diferencia $\sigma_{28\text{ proy}} - \sigma_{28}$	Diferencia en porcentaje
I	4,61	15,26	0,76	5,01
	14,50			
II	5,85	19,37	0,36	1,86
	19,01			
III	4,63	15,33	0,42	2,75
	14,91			
IV	5,24	17,35	2,87	16,55
	14,48			
V	4,96	16,42	0,22	1,36
	16,20			
VI	4,48	14,83	-0,10	-0,64
	14,93			
VII	4,11	13,61	-1,53	-11,25
	15,14			
VIII	4,64	15,36	-0,09	-0,56
	15,45			

Tabla 14. Desviaciones máximas para tres series al azar para un hervido de dos horas

MAXIMOS Y MINIMOS	
Series 4,6,7	-21,9
Series 1,2,4	17,73

2.5 Método sin hervido y ensayo a compresión a 24hs.

Para completar el estudio, se elaboraron ocho series más con desmoldado a las 23 horas y ensayo a las 24 horas, pero sin colocar las probetas en agua en ebullición. Se repitieron los análisis y los resultados se observan en las Tablas 15, 16 y 17.

Se corroboró, una vez más, la gran dispersión que se obtiene entre los resultados, por lo cual resultó inaplicable.

Tabla 15. Valores finales obtenidos para el método sin hervido y ensayado a las 24hs.

Días de rotura	Tensión media Mpa	Desviación estándar	Factor K (para n-1)	Tensión caract. Mpa	Porcentaje de Res. Caract. respecto de Res. a 28 días	Coefficiente "R" $r = \sigma_{1\text{ día}} / \sigma_{28\text{ días}}$
1	4,06	0,46	1,42	3,41	22,46	0,2246
28	16,78	1,12	1,42	15,18	100,02	

Tabla 16. Desviaciones individuales sin hervido y ensayado a 24hs.

Serie	Rotura compresión	$\sigma_{28\text{días}}$ proyectada	Diferencia $\sigma_{28\text{ proy}} - \sigma_{28}$	Diferencia en porcentaje
I	4,66	20,75	4,09	19,70
	16,66			
II	4,09	18,21	2,84	15,60
	15,37			
III	4,16	18,52	2,13	11,51
	16,39			
IV	4,59	20,44	1,48	7,22
	18,96			
V	3,95	17,59	-0,15	-0,87
	17,74			
VI	3,23	14,38	-1,57	-10,91
	15,95			
VII	3,75	16,70	0,49	2,91
	16,21			
VIII	4,02	17,90	0,94	5,24
	16,96			

Tabla 17. Desviaciones máximas para tres series al azar sin hervido y ensayado a 24hs.

MAXIMOS Y MINIMOS	
Series 1,6,7	-39,43
Series 1,2,4	21,08

Con estos últimos ensayos se confirmaron los resultados y conclusiones a las que se llegó con los estudios realizados en el proyecto anterior –Schierloh et al. (2018)- respecto del método natural. Se confirmó una vez más que a medida que se baja la edad de ensayo de las probetas curadas con el método normal y se lo relaciona con los ensayos a los 28 días, las dispersiones van en aumento. Con estos nuevos estudios, se corroboró que, para edades menores a tres días, la dispersión resultante aumenta.

El total de probetas ensayadas para esta primera etapa, fue de 160, repartidas en ocho series de cuatro probetas cada una.

3. RESULTADOS

Observando los resultados de los cinco procedimientos ensayados, los que se resumen en la Tabla 18, se puede decir:

-El método de la norma IRAM 1552 – LEMIT, fue el que dio las menores desviaciones, pero el tiempo de ensayo fue cuatro horas y media mayor al método propio encontrado.

- El método modificado IRAM 1552 – LEMIT con tres horas de hervido, dio desviaciones mayores al método original bajando el tiempo de ensayo solo en media hora.
- El método propio, dio desviaciones mayores al método IRAM 1552 –LEMIT, pero dentro del límite aceptable y a su vez disminuyó mucho el tiempo de ensayo, cuatro horas y media.
- El método propio con tiempo de hervido de dos horas, dio desviaciones mayores a lo propuesto disminuyendo muy poco el tiempo de ensayo, una hora.
- El método sin cocción, dio desviaciones muy elevadas, lo que confirma los resultados obtenidos en el trabajo anteriormente desarrollado Schierloh et al.(2018), respecto a la imposibilidad de ensayar probetas, sin acelerar el proceso de curado, en edades menores a siete días para proyectar la resistencia a los 28 días.

Tabla 18. Resumen numérico de los 5 métodos ensayados.

Orden	Método	Tensión caract. acelerada [MPa]	Tensión caract. 28 días [MPa]	Coficiente "R" $\sigma_{1\text{día}}/\sigma_{28\text{días}}$	Desviaciones grupales máximas [%]
1	IRAM 1552:03 - LEMIT	5,78	14,85	0,3893	-10,71/+10,35
2	IRAM 1552 –LEMIT con hervido de 3HS.	6,31	16,16	0,3881	-13,5/+10,27
3	MÉTODO PROPIO	5,87	15,03	0,3903	-13,00/+12,43
4	METODO PROPIO con 2 hs de hervido	4,06	13,46	0,3020	-21,09/+17,73
5	Sin hervido rotura 24HS	3,41	15,18	0,2246	-39,43/+21,08

4. CONCLUSIONES

- El hormigón dosificado fue aceptable como testigo para determinar el tiempo de desmolde límite, las horas necesarias de cocción de las probetas y el tiempo mínimo de enfriado de las probetas.
- Si bien es posible que, en la aplicación del método de curado acelerado de agua en ebullición, los productos de hidratación del cemento, sean levemente diferentes a los obtenidos con el curado normal, no se considera que sea una desventaja para su aplicación en la práctica de control rápido.
- En base a los análisis efectuados, se concluyó que el método propio sería el adecuado. Si bien es un método con dispersión mayor que el desarrollado en la norma IRAM 1552, los resultados dieron valores que se encuadran dentro de límites aceptables, logrando una disminución de cuatro horas y media de tiempo en la aplicación completa del método.

Consideración final; Con los materiales usados y el cemento empleado CPC40, la metodología desarrollada y usada podría aplicarse para el control de la resistencia en obra, para hormigones de cementos con adiciones (hasta el 40%).

En el laboratorio de Civil, donde se desarrolla este proyecto, tendrá aplicación directa, ya que por solicitud de empresas u organismos estatales se realizan, habitualmente, ensayos de compresión, con el fin de controlar y proyectar la resistencia de los hormigones a los 28 días.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer en primer lugar a las autoridades de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional. Al grupo de trabajo, particularmente a los estudiantes Lautaro Alza y Fernando Tauber por su compropiso y alto desempeño. Y muy especialmente al Ingeniero Héctor Retamal por su asesoramiento para el desarrollo y conclusiones.

6. REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials. (2003). ASTM C684: *Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens*. EEUU.

Barragan B, Di Maio A.Giaccio A., Traversa L. Zerbino R. (1999). *Hormigones elaborados con distintos agregados, expuestos a altas temperaturas*. Ciencia y Tecnología del hormigón. LEMIT N°7. Pp 27-41. <https://digital.cic.gba.gob.ar/handle/11746/418>

Cano Olazábal, W., Traversa, L.P, Giussi, J.H. (1976). “*Predicción de la resistencia del cemento Portland por el método del curado acelerado*”, Anales del LEMIT, La Plata, Argentina.

Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles. (2005). CIRSOC 201: *Reglamento argentino de estructuras de hormigón*. Argentina.

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales-INDECOPI. (2007). NTP 339.213: *Método de ensayo normalizado para la elaboración, curado acelerado y ensayo en compresión de especímenes de concreto*. Lima. Perú.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1993). IRAM1552: *Hormigón de cemento Portland, ensayo acelerado de la resistencia a la compresión*. Argentina.

Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2004). IRAM 1524:04: *Hormigón de cemento. Preparación y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral*. Argentina.

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (1994). NTC 1513: *Método de ensayo para la elaboración, curado acelerado y ensayo a compresión de especímenes de concreto*. Bogotá. Colombia.

Qi-ling Luo y Wei-Lun Wang. (2011). *Accelerated test methods for cement strength based on the weighted maturity theory*. Applied Mechanics and Materials Vols. 105-107 (2012). pp 897-901.

Quispe Paye D. (2017). *Aceleración de la evolución de la resistencia a la compresión del concreto hidráulico en diferentes relaciones agua cemento empleando agua en ebullición* – Tesis. Universidad Andina. Perú.

Schierloh, M.I., Retamal, H.R., Deusich L.D., Souchetti, R. (2018). “*Evaluación de la relación existente entre la resistencia a la compresión del hormigón a distintas edades y la especificada a los 28 días utilizando cemento compuesto CPC 40 y filerizado CPF 40 con áridos de la zona*.” Proyecto desarrollado en la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional.