

DETERMINACIÓN DE ECUACIONES PARA ESTIMAR LA RESISTENCIA POTENCIAL DEL HORMIGÓN A LOS 28 DÍAS, PARTIENDO DE EDADES TEMPRANAS

Mg. Ing. Schierloh, María Inés; Ing. Retamal, Héctor R.; Ing. Alza, Lautaro J.
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay,
Departamento Civil, Grupo de Investigaciones en Rehabilitación de Estructuras (GIRE)
Entre Ríos - Argentina
gire@frcu.utn.edu.ar

RESUMEN

Se presentan en este trabajo los resultados obtenidos en la segunda etapa del proyecto actualmente en desarrollo, el cual luego de haberse ajustado el procedimiento de un método propio de la aceleración del curado, usando agua en ebullición; se continuó, en este nuevo período, trabajando con cemento CPC40, adoptándose como variables, la clase de hormigón, H20, H25, H30 y H35, manteniendo el cemento y los áridos constantes. Se ensayaron, por cada clase de hormigón, 8 series de 4 probetas cada una. Se determinó la resistencia característica a las 24 horas y a los 28 días, se calculó la relación entre ambos valores, graficándose las curvas características y las ecuaciones de ajuste, para cada tipo de hormigón.

Finalmente se relacionaron los resultados obtenidos en los ensayos a compresión simple con los del curado acelerado ajustado, llegando a establecer ecuaciones que permitieron estimar la resistencia potencial a los 28 días del hormigón, a la edad de 24hs.

ABSTRACT

This paper presents the results obtained in the second stage of the project currently under development, which after having adjusted the procedure of an accelerated curing method, using boiling water. In this new stage, we continued working with CPC40 cement, and adopting as variables the concrete type, H20, H25, H30 and H35, keeping the cement and aggregates constant. For each concrete class, 8 series of 4 specimens each were tested. The characteristic strength was determined at time t and at 28 days, and the relationship between both values was calculated, plotting the characteristic curves and the adjustment equations for each type of concrete.

Finally, the results obtained in the simple compression tests were related to those of the adjusted accelerated curing, establishing equations that allowed estimating the potential resistance at 28 days of the concrete, at the age of 24hs.

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 proyectar la resistencia característica o especificada se dividen en dos grupos, métodos: natural y acelerados. En este estudio se trabajó con un método acelerado, ya que al igual que otros autores ⁽¹⁾, se concluyó, con los resultados del trabajo precedente ⁽²⁾, 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 ⁽³⁾, 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 ⁽¹⁾. 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. Perú la NTP 339.213 ⁽⁴⁾, Guatemala la NTG 41041 ⁽⁵⁾, Colombia NTC 1513 ⁽⁶⁾, México NMX-C-290-ONNCCE-2010 ⁽⁷⁾, entre otros. Un claro ejemplo de la necesidad de

estudios como el que se propone, es el hecho de que la norma ASTM 684 ⁽⁸⁾ se encuentra actualmente anulada, sin que haya previsiones de ser reemplazada por una nueva norma. Ello surge de la falta de consenso existente respecto al procedimiento de ensayo acelerado de resistencia a compresión. Por su parte, la norma IRAM 1522, basada en la norma norteamericana anulada, se encuentra en plena vigencia, aun cuando su última actualización data de 1993. De esta forma, es importante atender en la normativa nacional aquellas objeciones que existieren en el ámbito internacional.

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, se desarrolló en la primera etapa del proyecto, un análisis que consistió en encontrar y ajustar un método propio para el curado acelerado ⁽⁹⁾. Y a partir de ello se llevó a cabo un estudio de la variabilidad entre la resistencia a compresión simple de probetas de hormigón curado en forma normal (28 días) y las obtenidas en probetas curadas aplicando el método propio para acelerar el curado ⁽⁹⁾. Aquí se presenta el trabajo con cemento CPC 40. Manteniendo los áridos, la relación a/mc , el asentamiento y el tipo de cemento constante, la variable fue la clase de hormigón.

Procedimiento

Luego de ajustar el método de curado acelerado, se buscó obtener una fórmula que permita calcular la resistencia del hormigón a los 28 días, partiendo de ensayos a las 24 horas, para hormigones realizados con cemento CPC 40.

Para determinar la relación existente entre las tensiones características obtenidas de forma acelerada a las 24 horas y las alcanzadas a los 28 días, se realizaron ensayos con hormigones de resistencias características crecientes, cuyos resultados se volcaron en sistemas de ejes cartesianos para determinar la función matemática que los vincula. Para ello, aparte de los ensayos realizados con hormigón H15, realizados en el primer año, se llevaron a cabo ensayos con hormigones clases H20, H25, H30 y H35.

Según la norma IRAM 1552, y también para los investigadores en el LEMIT, la función matemática que los relaciona resultó ser hiperbólica. Sin embargo, la norma ASTM C 684, la norma peruana NTP 339.213 entre otros investigadores, la función matemática resultante fue una recta.

Inicialmente se acopiaron los áridos que fueron empleados en todos los pastones, y a continuación se procedió a realizar su caracterización, los resultados se muestran en

la Tabla 1.

Áridos	IRAM	Densidad relativa gr/cm ³	Absorción de agua %	IRAM 1505		MF de la mezcla
				TM mm	MF	
Arena fina del Río Uruguay	1520	2,5	0,7		1,53	5,25
Canto Rodado de Ar. Molino	1433	2,56	1,5	19		

Tabla 1 – Características de los áridos utilizados.

Se dosificaron los hormigones de clases 20, 25, 30 y 35, para relación agua material cemento 0,5, asentamiento 8 cm, utilizando cemento CPC 40. En la Tabla 2 se muestran los resultados.

Material	H20		H25		H30		H35	
	Vol. [m ³]	Peso [Kg]	Vol. [m ³]	Peso [Kg]	Vol. [m ³]	Peso [Kg]	Vol. [m ³]	Peso [Kg]
Cemento	0,104	320	0,109	337	0,115	354	0,130	400
Agua	0,160	160	0,169	169	0,177	177	0,200	200
Canto Rodado	0,423	1071	0,433	1096	0,425	1075	0,402	1020
Arena	0,313	829	0,289	765	0,283	750	0,268	710
Total	1	2380	1	2367	1	2356	1	2330
Relacion a/mc	0,5		0,5		0,5		0,5	

Tabla 2 – Dosificación de las diferentes clases de hormigón con que se trabajó.

Para cada clase de hormigón se realizaron ocho series de cuatro probetas cada una, a fin de realizar ensayos dobles para cada serie, tomando como valor de ensayo la media aritmética de ambos valores, siempre que no supere cada valor individual un 15% el valor medio obtenido.

Se elaboró el pastón y se colocó el hormigón en moldes metálicos estándar de 30cm de altura y 15 cm de diámetro, dejándolos en cámara húmeda durante 20 horas.

De cada serie, se desmoldaron dos probetas a las 20 horas y las otras dos siguieron su proceso en cámara húmeda hasta el día 28.

A las 20 ½ horas se colocaron las dos probetas desmoldadas de la serie en agua en ebullición. Durante tres horas, permanecieron las probetas sumergidas luego, se

sacan y se las dejó a temperatura ambiente, por un período de media hora, para su enfriamiento, se las ensaya a compresión, utilizando la normativa vigente en el país esto es IRAM 1524 -1546- 1541 y 1553 (10, 11, 12 y 13).

Como valor de ensayo, se toma la media aritmética de ambos ensayos a compresión simple, siempre que los valores individuales no superen el 15% de la media aritmética.

A los 28 días, se ensayan las dos probetas de la serie que completaron el proceso de curado en cámara húmeda.

Como valor de ensayo, se tomó la media aritmética de ambos ensayos a compresión simple, siempre que los valores individuales no superen el 15% de la media aritmética.

El total de probetas ensayadas para los cuatro tipos de hormigón (H20, H25, H30 y H35) fue de 128, repartidas en ocho series de cuatro probetas cada una. Para el hormigón H15, se tomaron los valores de ensayo del primer año realizado para este tipo de hormigón.

Resultados

Resultado de los ensayos para hormigón H20:

Efectuados los ensayos de las ocho series, se determinó la tensión característica o especificada a las 24 horas y a los 28 días, estableciéndose la relación σ/σ_{28} días (tensión característica o especificada a las 24hs respecto de la tensión característica o especificada a los 28 días), los resultados se muestran en el Tabla 3 y con las ocho series se determinaron los valores finales que se muestran en el Tabla 4.

ENSAYOS ACCELERADOS DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN H20, CON CPC 40 LOMA NEGRA
DESMOLDADO A LAS 20 HORAS, CURADO ACCELERADO 3 HORAS Y ENFRIAMIENTO 1/2 HORA Y ROTURA A LAS 24 HORAS

SERIE	FECHA	PROBETAS	DÍAS DE	ASENT.	FECHA DE	CARGA	CARGA	Tensión	Tensión	DIFERENCIA	DIFERENCIA	CARGA	Tensión	COEFICIENTE "R"
	ELAB.	N°	ROTURA	(Cm)	ROTURA	(tn)	(tn)	Rotura (1)	Rotura (2)	(%)	(%)	(tn)	rotura (Mpa)	
I	8/10/2018	1	1	8,5	9/10/2018	14,77	14,75	8,20	8,19	0,07	-0,07	14,76	8,20	0,39
		2	28		5/11/2018	39,36	37,16	21,85	20,63	2,88	-2,88	38,26	21,24	
II	8/10/2018	1	1	8	9/10/2018	14,52	15,2	8,06	8,44	-2,29	2,29	14,86	8,25	0,40
		2	28		5/11/2018	36,73	38,22	20,39	21,22	-1,99	1,99	37,48	20,81	
III	9/10/2018	1	1	7,5	10/10/2018	14,89	14,7	8,27	8,16	0,64	-0,64	14,80	8,21	0,40
		2	28		6/11/2018	37,1	37,52	20,60	20,83	-0,56	0,56	37,31	20,72	
IV	9/10/2018	1	1	7	10/10/2018	15,74	15,2	8,74	8,44	1,75	-1,75	15,47	8,59	0,37
		2	28		6/11/2018	41,72	40,93	23,16	22,73	0,96	-0,96	41,33	22,95	
V	10/10/2018	1	1	8	11/10/2018	15,93	15,68	8,85	8,71	0,79	-0,79	15,81	8,78	0,43
		2	28		7/11/2018	39,06	35,17	21,69	19,53	5,24	-5,24	37,12	20,61	
VI	10/10/2018	1	1	8	11/10/2018	16,19	16,45	8,99	9,13	-0,80	0,80	16,32	9,06	0,43
		2	28		7/11/2018	38,94	37,24	21,62	20,68	2,23	-2,23	38,09	21,15	
VII	11/10/2018	1	1	8	12/10/2018	13,68	13,96	7,60	7,75	-1,01	1,01	13,82	7,67	0,42
		2	28		8/10/2018	32,61	32,44	18,11	18,01	0,26	-0,26	32,53	18,06	
VIII	11/10/2018	1	1	8	12/10/2018	15,99	15,54	8,66	8,63	0,16	-0,16	15,57	8,64	0,40
		2	28		8/11/2018	38,2	39,64	21,21	22,01	-1,85	1,85	38,92	21,61	

Tabla 3 – Resultados para Hormigones clase H20 y CPC 40.

DÍAS DE ROTURA	TENSION MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K (para n-1)	TENSION CARACTERISTICA Mpa	PORCENTAJE DE RESISTENCIA CARACTERISTICA RESPECTO DE RESISTENCIA A 28 DIAS	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{dia}}/\sigma_{28\text{dias}}$
1	8,43	0,42	1,42	7,83	41,30	0,4129
28	20,89	1,37	1,42	18,95	100,00	

Tabla 4 – Valores finales para Hormigones clase H20 y CPC 40

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

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

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

SERIES	Tensión de rotura	σ_{28} proy.	Diferencia $\sigma_{28\text{proy}} - \sigma_{28}$	Diferencia en porcentaje
I	8,2	19,86	-1,38	-6,95
	21,24			
II	8,25	19,98	-0,83	-4,15
	20,81			
III	8,21	19,88	-0,84	-4,21
	20,72			
IV	8,59	20,80	-2,15	-10,31
	22,95			
V	8,78	21,26	0,65	3,08
	20,61			
VI	9,06	21,94	0,79	3,61
	21,15			
VII	7,67	18,58	0,52	2,78
	18,06			
VIII	8,64	20,93	-0,68	-3,27
	21,61			

Tabla 5 – Desviación individual de las 8 series.

A continuación, se realizó un análisis estadístico, partiendo del coeficiente $R=0,4129$, 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 5.

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

El coeficiente $R=0,4129$, 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 5, resume este concepto.

Del análisis de los porcentajes de desviación, se observó que individualmente las desviaciones resultaron todas debajo del 15%, siendo la máxima desviación -10,31%.

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:

$$C = n! / r! * (n - r)! \quad (1)$$

Siendo:

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

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

Reemplazando en (1) $C = 8! / 3! * (8-3)! = 56$ 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:

$$\% = 1/56 = 0,01785 = 1,78 \% \quad (2)$$

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 6.

MAXIMOS Y MINIMOS	
SERIES 1,2,6	-12,26
SERIES 3,4,7	9,57

Tabla 6 – Desviaciones máximas para tres series al azar, de las 56 combinaciones.

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.

Resultado de los ensayos para hormigón H25:

Se repitieron los procedimientos para el hormigón dosificado clase H25, los resultados se muestran en la Tabla 7.

Y los valores finales se muestran en la siguiente Tabla 8.

SERIE	FECHA ELABORACION	PROBETAS N°	EDAD DE ROTURA	ASENTAMIENTO (Cm)	FECHA DE ROTURA	CARGA ROTURA (1) (tn)	CARGA ROTURA (2) (tn)	TENSIÓN ROTURA (1) Mpa	TENSIÓN ROTURA (2) Mpa	DIFERENCIA		CARGA ROTURA (Tn)	TENSIÓN ROTURA Mpa	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{ dia}}/\sigma_{28\text{ dias}}$
										(1) (%)	(2) (%)			
I	10/9/2018	1	1	7	11/9/2018	21,21	20,21	11,78	11,22	2,41	-2,41	20,71	11,50	0,40
		2	28		8/10/2018	52,21	52,24	28,99	29,01	-0,03	0,03	52,23	29,00	
II	10/9/2018	1	1	8	11/9/2018	20,49	22,18	11,38	12,32	-3,96	3,96	21,34	11,85	0,42
		2	28		8/10/2018	49,19	52,34	27,31	29,06	-3,10	3,10	50,77	28,19	
III	11/9/2018	1	1	8	12/9/2018	20,67	18,65	11,48	10,36	5,14	-5,14	19,66	10,92	0,39
		2	28		9/10/2018	50,76	49,33	28,18	27,39	1,43	-1,43	50,05	27,79	
IV	11/9/2018	1	1	8	12/9/2018	20,72	21,04	11,50	11,68	-0,77	0,77	20,88	11,59	0,42
		2	28		9/10/2018	48,62	51,34	27,00	28,51	-2,72	2,72	49,98	27,75	
V	12/9/2018	1	1	9	13/9/2018	18,62	18,58	10,34	10,32	0,11	-0,11	18,60	10,33	0,41
		2	28		10/10/2018	45,56	45,24	25,30	25,12	0,35	-0,35	45,40	25,21	
VI	12/9/2018	1	1	9	13/9/2018	19,01	18,17	10,56	10,09	2,26	-2,26	18,59	10,32	0,38
		2	28		10/10/2018	49,28	48,27	27,36	26,80	1,04	-1,04	48,78	27,08	
VII	13/9/2018	1	1	8,5	14/9/2018	19,2	18,89	10,66	10,49	0,81	-0,81	19,05	10,57	0,42
		2	28		11/10/2018	44,78	45,76	24,86	25,41	-1,08	1,08	45,27	25,14	
VIII	13/9/2018	1	1	7,5	14/9/2018	18,88	20,05	10,48	11,13	-3,01	3,01	19,47	10,81	0,40
		2	28		11/10/2018	46,4	49,75	25,76	27,62	-3,48	3,48	48,08	26,69	

Tabla 7 – Resultados para Hormigones clase H25 y CPC 40.

DIAS DE ROTURA	TENSION MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K (para n-1)	TENSIÓN CARACTERÍSTICA Mpa	PORCENTAJE DE RESISTENCIA CARACTERÍSTICA RESPECTO DE RESISTENCIA A 28 DÍAS	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{ dia}}/\sigma_{28\text{ dias}}$
1	10,99	0,59	1,42	10,15	40,34	0,4034
28	27,11	1,38	1,42	25,15	100,00	

Tabla 8 – Valores finales para Hormigones clase H25 y CPC 40

El coeficiente R= 0,4034, 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, podremos observar las desviaciones individuales que se producen.

SERIE	ROTURA COMPRESION	σ_{28} proy.	Diferencia σ_{28} proy- σ_{28}	DIFERENCIA EN PORCENTAJE
I	11,5	28,51	-0,49	-1,73
	29			
II	11,85	29,38	1,19	4,04
	28,19			
III	10,92	27,07	-0,72	-2,66
	27,79			
IV	11,59	28,73	0,98	3,41
	27,75			
V	10,33	25,61	0,40	1,55
	25,21			
VI	10,32	25,58	-1,50	-5,85
	27,08			
VII	10,57	26,20	1,06	4,05
	25,14			
VIII	10,81	26,80	0,11	0,40
	26,69			

Tabla 9 – Desviación individual de las 8 series.

En este caso también, se observó que individualmente las desviaciones toman valores por debajo del 15%, siendo la máxima desviación un -5,85%.

Y al hacer es estudio grupal, las mayores desviaciones obtenidas de las 56 combinaciones, se presentan en la Tabla 10. Donde se observa que en ningún caso se superan.

MAXIMOS Y MINIMOS	
SERIES 2,3,6	-12,19
SERIES 3,7,8	7,07

Tabla 10 – Desviaciones máximas para tres series al azar, de las 56 combinaciones.

Resultado de los ensayos para hormigón H30:

Se procedió de igual manera para el hormigón dosificado clase H30, los resultados se muestran en la Tabla 11.

Los valores finales se resumen en la Tabla 12.



SERIE	FECHA ELABORACION	PROBETAS N°	DIAS DE ROTURA	ASENTAMIENTO (Cm)	FECHA DE ROTURA	CARGA ROTURA (1) (tn)	CARGA ROTURA (2) (tn)	TENSIÓN ROTURA (1) Mpa	TENSIÓN ROTURA (2) Mpa	DIFERENCIA (1) (%)	DIFERENCIA (2) (%)	CARGA ROTURA (Tn)	TENSIÓN ROTURA Mpa	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{día}}/\sigma_{28\text{días}}$
I	25/9/2018	1	1	9	26/9/2018	23,78	24,41	13,20	13,55	-1,31	1,31	24,10	13,38	0,44
		2	28		23/10/2018	57,13	51,28	31,72	28,47	5,40	-5,40	54,21	30,10	
II	25/9/2018	1	1	7,5	26/9/2018	24,21	25,07	13,44	13,92	-1,75	1,75	24,64	13,68	0,42
		2	28		23/10/2018	63,18	54,09	35,08	30,03	7,75	-7,75	58,64	32,56	
III	26/9/2018	1	1	7,5	27/9/2018	23,09	22,01	12,82	12,22	2,39	-2,39	22,55	12,52	0,45
		2	28		24/10/2018	48,54	51,94	26,95	28,84	-3,38	3,38	50,24	27,90	
IV	26/9/2018	1	1	8	27/9/2018	24,56	25,61	13,64	14,22	-2,09	2,09	25,09	13,93	0,45
		2	28		24/10/2018	57,99	54,15	32,20	30,07	3,42	-3,42	56,07	31,13	
V	27/9/2018	1	1	8,8	28/9/2018	21,94	22,04	12,18	12,24	-0,23	0,23	21,99	12,21	0,41
		2	28		25/9/2018	52,25	54,62	29,01	30,33	-2,22	2,22	53,44	29,67	
VI	27/9/2018	1	1	8	28/9/2018	20,94	23,47	11,63	13,03	-5,70	5,70	22,21	12,33	0,40
		2	28		25/9/2018	56,26	55,45	31,24	30,79	0,73	-0,73	55,86	31,01	
VII	1/10/2018	1	1	8	2/10/2018	21,5	21,23	11,94	11,79	0,63	-0,63	21,37	11,86	0,40
		2	28		29/10/2018	54,65	52,35	30,34	29,07	2,15	-2,15	53,50	29,71	
VIII	1/10/2018	1	1	9	2/10/2018	21,14	21,67	11,74	12,03	-1,24	1,24	21,41	11,89	0,40
		2	28		29/10/2018	58,25	49,67	32,34	27,58	7,95	-7,95	53,96	29,96	

Tabla 11 – Resultados para Hormigones clase H30 y CPC 40.

DIAS DE ROTURA	TENSIÓN MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K (para n-1)	TENSIÓN CARACTERÍSTICA Mpa	PORCENTAJE DE RESISTENCIA CARACTERÍSTICA RESPECTO DE RESISTENCIA A 28 DIAS	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{día}}/\sigma_{28\text{días}}$
1	12,72	0,82	1,42	11,56	69,85	0,4082
28	30,25	1,36	1,42	28,32	171,13	

Tabla 12 – Valores finales para Hormigones clase H30 y CPC 40.

El coeficiente R= 0,4082, es el resultante para las ocho series ensayadas.

SERIE	ROTURA COMPRESION	σ_{28} proy.	Diferencia $\sigma_{28\text{proy}} - \sigma_{28}$	DIFERENCIA EN PORCENTAJE
I	13,38	32,78	2,68	8,17
	30,1			
II	13,68	33,51	0,95	2,84
	32,56			
III	12,52	30,67	2,77	9,04
	27,9			
IV	13,93	34,13	3,00	8,78
	31,13			
V	12,21	29,91	0,24	0,81
	29,67			
VI	12,33	30,21	-0,80	-2,66
	31,01			
VII	11,89	29,13	-0,58	-2,00
	29,71			
VIII	11,89	29,13	-0,83	-2,86
	29,96			

Tabla 13 – Desviación individual de las 8 series.

Si analizamos las series individualmente, comparando los resultados de los ensayos con los proyectados aplicando el coeficiente "R" hallado, observándose las desviaciones individuales que se producen. Se muestran en Tabla 13.

Se pudo constatar que individualmente las desviaciones están todas debajo del 15%, siendo la máxima desviación un 9,04%.

Las mayores desviaciones obtenidas de las 56 combinaciones, están expresadas en la Tabla 14, donde se puede notar que las desviaciones en el caso más desfavorable de tres series tomadas al azar no superaron el 15%.

MAXIMOS Y MINIMOS	
SERIES 4,7,8	-13,79
SERIES 1,2,3	12,71

Tabla 14 – Desviaciones máximas para tres series al azar, de las 56 combinaciones.

Resultado de los ensayos para hormigón H35:

El procedimiento fue el mismo, utilizando esta vez un hormigón dosificado para clase H35, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 15.

Los valores finales se resumen en la Tabla 16.

SERIE	FECHA ELABORACION	PROBETAS N°	DIAS DE ROTURA	ASENTAMIENTO (Cm)	FECHA DE ROTURA	CARGA ROTURA (1) (tn)	CARGA ROTURA (2) (tn)	TANSIÓN ROTURA (1) Mpa	TANSIÓN ROTURA (2) Mpa	DIFERENCIA (1) (%)	DIFERENCIA (2) (%)	CARGA ROTURA (Tn)	TENSIÓN ROTURA Mpa	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{dia}}/\sigma_{28\text{dias}}$
I	5/11/2018	1	1	9	6/11/2018	26,61	26,97	14,78	14,98	-0,67	0,67	26,79	14,88	0,41
		2	28		3/12/2018	66,69	64,22	37,03	35,66	1,89	-1,89	65,46	36,34	
II	5/11/2018	1	1	7,5	6/11/2018	26,65	28,99	14,80	16,10	-4,21	4,21	27,82	15,45	0,43
		2	28		3/12/2018	66,77	61,7	37,07	34,26	3,95	-3,95	64,24	35,67	
III	06/11/2018	1	1	9	7/11/2018	26,24	26,55	14,57	14,74	-0,59	0,59	26,40	14,66	0,42
		2	28		4/12/2018	61,57	63,19	34,19	35,09	-1,30	1,30	62,38	34,64	
IV	6/11/2018	1	1	7	7/11/2018	26,68	26,11	14,82	14,50	1,10	-1,10	26,40	14,66	0,40
		2	28		4/12/2018	67,81	63,62	37,65	35,32	3,19	-3,19	65,72	36,49	
V	7/11/2018	1	1	7,5	8/11/2018	25,72	25,79	14,28	14,32	-0,14	0,14	25,76	14,30	0,43
		2	28		5/12/2018	61,89	58,72	34,36	32,60	2,63	-2,63	60,31	33,48	
VI	7/11/2018	1	1	7,5	8/11/2018	24,77	24	13,75	13,33	1,58	-1,58	24,39	13,54	0,39
		2	28		5/12/2018	63,6	62,89	35,31	34,92	0,56	-0,56	63,25	35,12	
VII	8/11/2018	1	1	8	9/11/2018	24,45	24,28	13,58	13,48	0,35	-0,35	24,37	13,53	0,40
		2	28		6/12/2018	60,93	62,16	33,83	34,51	-1,00	1,00	61,55	34,17	
VIII	8/11/2018	1	1	8	9/11/2018	23,67	23,96	13,14	13,30	-0,61	0,61	23,82	13,22	0,41
		2	28		6/12/2018	59,02	58,56	32,77	32,52	0,39	-0,39	58,79	32,64	

Tabla 15 – Resultados para Hormigones clase H35 y CPC 40.

DIAS DE ROTURA	TENSION MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K (para n-1)	TENSION CARACTERISTICA Mpa	PORCENTAJE DE RESISTENCIA CARACTERISTICA RESPECTO DE RESISTENCIA A 28 DIAS	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{dia}}/\sigma_{28\text{dias}}$
1	14,28	0,67	1,42	13,33	40,53	0,4053
28	34,82	1,36	1,42	32,89	100,00	

Tabla 16 – Valores finales para Hormigones clase H35 y CPC 40

El coeficiente $R=0,4053$, es el resultante para las ocho series ensayadas. Si analizamos las series individualmente, comparando los resultados de los ensayos con los proyectados aplicando el coeficiente "R" hallado, observándose las desviaciones individuales que se producen. Se muestran en Tabla 17.

SERIE	ROTURA COMPRESION	σ_{28} proy.	Diferencia $\sigma_{28\text{proy}} - \sigma_{28}$	DIFERENCIA EN PORCENTAJE
I	14,88	36,71	0,37	1,02
	36,34			
II	15,45	38,12	2,45	6,43
	35,67			
III	14,66	36,17	1,53	4,23
	34,64			
IV	14,66	36,17	-0,32	-0,88
	36,49			
V	14,3	35,28	1,80	5,11
	33,48			
VI	13,54	33,41	-1,71	-5,13
	35,12			
VII	13,53	33,38	-0,79	-2,36
	34,17			
VIII	13,22	32,62	-0,02	-0,07
	32,64			

Tabla 17 – Desviación individual de las 8 series

Se pudo constatar que individualmente las desviaciones están todas debajo del 15%, siendo la máxima desviación un 6,43%.

Las mayores desviaciones obtenidas de las 56 combinaciones, se muestran en la Tabla 18, donde se puede observar que, nuevamente, las desviaciones en el caso más desfavorable de tres series tomadas al azar no superaron el 15%.

MAXIMOS Y MINIMOS	
SERIES 2,6,7	-12,54
SERIES 3,4,5	8,6

Tabla 18 – Desviaciones máximas para tres series al azar, de las 56 combinaciones

Comparación entre valores de ensayo y los resultados aplicando la fórmula, para mezclas con cemento compuesto CPC 40.

Los valores finales y las desviaciones determinadas respecto a los coeficientes calculados de las 40 series elaboradas para hormigones usando cemento CPC40, se resumen en la Tabla 19.

CLASE HORMIGON	TENSION CARACT. 1 DIA	TENSION CARACT. 28 DIAS	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{dia}}/\sigma_{28\text{dias}}$	DESVIACIONES GRUPALES MAXIMAS - (%)
H15	5,87	15,03	0,391	-13,00/+12,43
H20	7,83	18,95	0,413	-12,26/+9,57
H25	10,15	25,15	0,404	-12,19/+7,07
H30	11,56	28,32	0,408	-13,79/+12,71
H35	13,33	32,89	0,405	-12,54/+8,6

Tabla 19 – Desviaciones grupales máximas calculadas para hormigones usando cemento CPC40.

Con los valores finales de las resistencias características mostradas en le Tabla 19, se determinó la función y la fórmula matemática que la expresa.

Los valores de las resistencias características, pueden ser representados en un sistema de ejes cartesianos como los de la Figura 1.

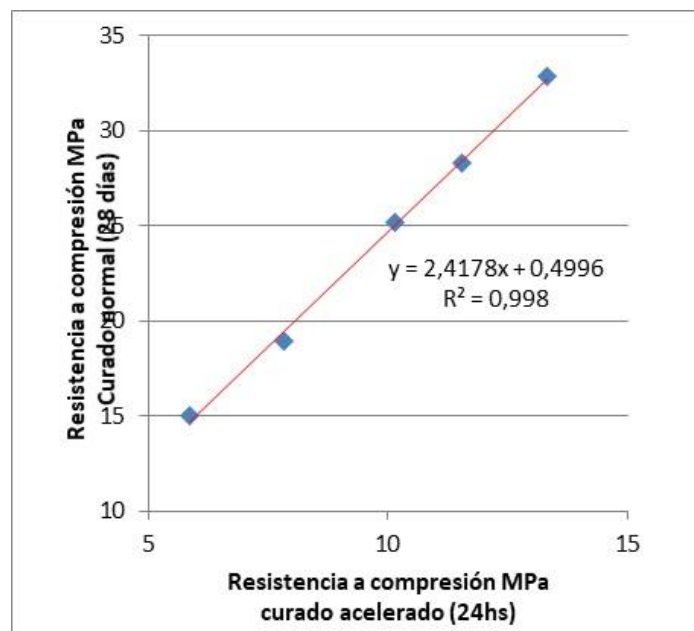


Figura 1. Relación entre las tensiones características a 1 día y a 28 días, grupales.

La función que se ajusta por mínimos cuadrados, es la de una recta. En el gráfico se muestran los valores obtenidos y el ajuste. Para escoger la mejor ecuación de regresión, se aplicó el criterio estadístico, de que, a la mejor ecuación de regresión, le corresponde el coeficiente de correlación “más cercano a 1 y mayor de 0,8”.

Si se observa el gráfico considerando, en este caso, el total de resultados (40), se

confirma que la función que mejor ajusta es una recta. Como se observa en la Figura 2.

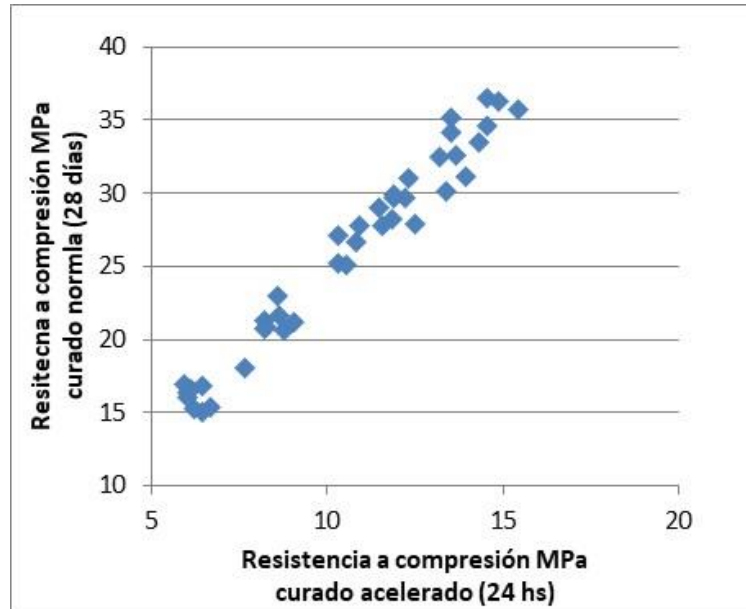


Figura 2. Relación entre las tensiones características a 1 día y a 28 días, considerando los 40 resultados en forma individual.

La ecuación de una recta genérica, se expresa de la siguiente manera.

$$Y = a + bX \quad (3)$$

Donde

a y b son constantes
X e Y, las variables.

Para corroborar los valores mostrados en la Figura 1, se resolvió la ecuación lineal, aplicando el método de “mínimos cuadrados”.

Las constantes “a” y “b”, se calcularon por las siguientes ecuaciones:

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (4)$$

$$a = \bar{Y} - b\bar{X} \quad (5)$$

Donde:

S_{xy} , es el producto de las diferencias de cada valor individual con la media aritmética de cada uno de ellos.

$$S_{xy} = \sum(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}). \quad (6)$$

Sxx (Mínimos cuadrados con respecto a X), es la sumatoria de las diferencias de cada valor individual de los ensayos acelerados, con la media aritmética de dichos valores.

$$S_{xx} = \sum(X_i - \bar{X})^2 \quad (7)$$

La media aritmética de los valores de ensayos acelerados es la sumatoria de dichos valores, dividido por la cantidad de ensayos.

$$\bar{X} = \sum \frac{X_i}{n} \quad (8)$$

La media aritmética de los valores de ensayo a los 28 días, es la sumatoria de dichos valores, dividido por la cantidad de ensayos.

$$\bar{Y} = \sum \frac{Y_i}{n} \quad (9)$$

Resolviendo todas las ecuaciones anteriores, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 20. Corroborando los datos de la gráfica.

ECUACIONES	UNIDAD	VALOR
Xpromedio	Mpa	9,748
Ypromedio	Mpa	24,068
Sxy	(Mpa) ²	84,60568
Sxx	(Mpa) ²	34,993276
a	Mpa	0,499584332
b		2,417769355

Tabla 20 – Resultados calculados usando mínimos cuadrados.

Se obtuvo de esta manera, la ecuación de proyección para hormigones con las características especificadas para este trabajo, y usando cemento CPC40.

$$\sigma_{28 \text{ días}} = 0,49958MPa + 2,4177\sigma_{24 \text{ horas}} \quad (10)$$

Corroborada la ecuación se procedió a realizar la comparación entre valores obtenidos de ensayos y los proyectados utilizando la fórmula, los resultados se muestran en la Tabla 21.

CLASE HORMIGON	TENSION CARACT. 1 DIA	TENSION CARACT. ENSAYO 28 DIAS	TENSION CARACT. PROYECTADA	DIFERENCIA Mpa	DIFERENCIA %	COEFICIENTE "R" $\sigma_{1\text{dia}}/\sigma_{28\text{dias}}$
H15	5,87	15,03	14,69	-0,34	-2,31	0,399540172
H20	7,83	18,95	19,43	0,48	2,47	0,402970187
H25	10,15	25,15	25,04	-0,11	-0,44	0,405352354
H30	11,56	28,32	28,45	0,13	0,46	0,406341192
H35	13,33	32,89	32,73	-0,16	-0,49	0,407290894

Tabla 21 – Comparación entre valores de ensayos a los días y los proyectados aplicando la fórmula, para mezclas con CPC40.

Observando la columna 6, se aprecia que las diferencias obtenidas para cada tipo de hormigón, considerando las ocho series elaboradas para cada uno, si se comparan los valores de ensayos y los proyectados con la formula, son mínimas, ya que la máxima desviación obtenida fue de 2,47%.

Se realizó nuevamente un análisis estadístico, primero en forma individual de los resultados de las series, que tuvo como fin observar la dispersión de los valores individuales de cada serie respecto de las obtenidas aplicando la fórmula, se tabularon los valores de forma similar a las Tablas 5, 9.13 y 35 además de la realizada para el hormigón clase H15, pero en la columna 3 para los valores de σ_{28} proy. se colocaron los valores calculados con la fórmula hallada.

De esta forma se constató que individualmente las desviaciones resultaron todas debajo del 15%, siendo la máxima desviación de -13,70%.

La probabilidad de que ese evento ocurra es $1/40 = 2,5\%$.

Se determinó el INDICE DE CONFIANZA, denominando así al porcentaje de probabilidades de que una desviación, en el control de calidad de un hormigón, ocurra.

Teniendo en cuenta que, de las 40 series ensayadas, las desviaciones menores al 5% ocurrieron 24 veces. Las desviaciones mayores al 5%, pero menores al 10 %, ocurrieron 14 veces. Las desviaciones mayores al 10 %, pero menores al 15%, ocurrieron 2 veces. Se hicieron los cálculos cuyos resultados se muestran en la Tabla 22.

PROBETAS INDIVIDUALES	
DESVIACION	INDICE DE CONFIANZA [%]
<5%	60
>5%- <10%	35
>10% - <15%	5

Tabla 22 – Índice de confianza para series individuales.

Estos resultados indican que existe un 60 % de probabilidad de que, al ensayar series individuales, la desviación entre los valores proyectados por la formula obtenida y los

valores de ensayo estén por debajo del 5%. La probabilidad de que esas desviaciones den entre el 5% y el 10 %, son de un 35 %. Y por último las probabilidades que esas desviaciones estén por encima del 10%, pero debajo del 15% son de un 5%.

La función se basa en las “tensiones características o especificadas” para ocho series de cada uno de las cinco clases de hormigón ensayados. Sin embargo, como el reglamento argentino CIRSOC 201:05, especifica un mínimo de tres series para determinar dichas tensiones. Es decir, con el resultado de tres series, como mínimo, se obtienen las tensiones características o especificadas a las 24 hs, con estos resultados se proyectaron los valores aplicando la fórmula hallada, las tensiones a 28 días así determinadas tendrán desviaciones respecto a las obtenidas a partir de los resultados de ensayos a esa edad.

Por otra parte, como ya se expresó en el trabajo anterior ⁽⁹⁾ que, al aumentar el número de series ensayadas, estas desviaciones disminuyen, por lo que se infiere que la situación más desfavorable se da tomando las series de a tres.

Para cada clase de hormigón, se calcularon las combinaciones posibles de ocho elementos tomados de a tres, lo que dio un total de 56 combinaciones posibles.

Con estos resultados se pudo analizar las mayores desviaciones, en cuales series se obtuvieron y para qué clase de hormigón. En todos los casos se pudo constatar que no se superó el límite propuesto del 15%. Los resultados finales se presentan en la Tabla 23.

SERIES	CLASE HORMIGON	DESVIACION [%]
3,5,8	H 15	-14,45
1,2,3	H 30	13,11

Tabla 23 – Desviaciones máximas para tres series de ocho tomadas a azar, aplicando la fórmula hallada, para el caso de usar cemento CPC40.

Conclusiones

A partir de los resultados analizados en esta etapa del proyecto Utilizando cemento CPC40, se pudo concluir:

-Las diferentes Clases de hormigones dosificados alcanzaron valores de resistencia a la compresión adecuados.

-Se pudo corroborar que el proceso de curado acelerado del hormigón, según lo determinado en el primer período de este proyecto, permaneciendo 3 horas en agua en ebullición, fue eficiente ya que se pudo constatar que las resistencias a las 24hs se proyectaron a las alcanzadas a 28 días con dispersiones menores al 15% en todos los casos.

-La ecuación de regresión recomendada por la IRAM 1552, no siempre constituye la

mejor ecuación para la predicción de la resistencia del hormigón. En el presente trabajo, para cemento CPC40, se determinó que la ecuación de regresión lineal ($\sigma_{28 \text{ días}} = 0,49958MPa + 2,4177\sigma_{24 \text{ horas}}$), es la que da resultados proyectados que mejor se aproximan a los reales, hecho que se confirma por presentar un coeficiente de correlación de 0,998, muy próximo a 1.

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 al Ing. Fernando Tauber por su compromiso y alto desempeño. Y destacar los aportes realizados por el Ingeniero Héctor Retamal en referencia al asesoramiento para el desarrollo y conclusiones.

Referencias:

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1993). IRAM1552: *Hormigón de cemento Portland, ensayo acelerado de la resistencia a la compresión*. Argentina.
- (4) 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.
- (5) Norma Técnica Guatemalteca (2014). NTG 41041. *Práctica para el curado acelerado de cilindros de concreto*. Guatemala.
- (6) 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.
- (7) Normas Mexicanas. Organización Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2010). NMX-C-290-ONNCCE-2010. *Determinación del curado acelerado para el ensayo a compresión de especímenes de concreto hidráulico*. México.
- (8) American Society for Testing and Materials. (2003). ASTM C684. *Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens*. EEUU.
- (9) M.I. Schierloh, V.C. Rougier, J.D. Sota (2021). *Adecuación de un método de curado acelerado para Hormigones elaborados con cementos Portland CPC40 y áridos de la zona de Concepción del Uruguay*. XVI Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XVIII de Control de Calidad en la Construcción. CONPAT2021. Brasil.

- (10) 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.
- (11) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1992). IRAM 1546:92 *Hormigón de Cemento Portland Método de Ensayo a Compresión.* Argentina.
- (12) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (1991). IRAM 1541:91 *Hormigón de cemento portland. Hormigón fresco. Muestreo.* Argentina.
- (13) Instituto Argentino de Normalización y Certificación. (2008). IRAM 1553:08 *Hormigón de cemento. Preparación de las bases de probetas cilíndricas y testigos cilíndricos, para ensayo de compresión.* Argentina.