

Estudio sobre variación de la resistencia a compresión en el tiempo, para hormigones utilizando cemento cpc40 y áridos de la zona de Concepción del Uruguay - Entre Ríos

M.I. Schierloh¹, R.F. Souchetti¹, L.D. Dusich¹, L.J. Alza¹

¹ Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras (G.I.R.E.), Facultad Regional Concepción del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, Tel/Fax: (03442) 425-541 / 423-803, int. 162, Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, E3264BTD - Entre Ríos - Argentina, e-mail: gireutnfrcu@gmail.com, web: <http://gireutnfrcu.blogspot.com.ar>

RESUMEN

Poder estimar la resistencia de un hormigón a los 28 días, partiendo de resistencias a la compresión determinadas a edades mayores o menores, es fundamental, pues las estructuras de hormigón armado, se calculan a partir de la resistencia especificada del hormigón a los 28 días y muchas veces por razones técnicas u operativas, las probetas se ensayan a edades diferentes.

Se plantea, en este trabajo, un análisis de la relación existente entre resistencias obtenidas a diferentes edades respecto a las alcanzadas a los 28 días, para hormigones elaborados y mantenidos en idénticas condiciones. A partir de lo cual se estableció un modelo de predicción de la resistencia del hormigón a dicha edad. Utilizando Cemento Portland Compuesto (CPC 40) argentino, una relación a/mc de 0,5, hormigones denominados H-20 ejecutados con agregados de la zona de Concepción del Uruguay, Provincia de Entre Ríos, Argentina.

Palabras clave: Hormigón, Control de calidad, Resistencia a compresión simple, Maduración.

ABSTRACT

Being able to predict the concrete strength at the age of 28 days, from values determined at major or minor ages is fundamental. Considering this, reinforced concrete structures are calculated from the specified concrete strength at the age of the 28 days, and in many times, is usual that samples are tested at different ages for technical or operational reasons.

An analysis of the existence relationship between concrete strengths obtained at different concrete ages was carried out in this work. The concrete batches were maintained at the same conditions and strength results were compared with the value obtained at the age of 28 days. From the experimental results, a prediction model of the concrete strength at 28 days was established. Argentinian Portland Cement Compound (CPC 40), a ratio of w/mc equals to 0.5, and concretes manufactured with aggregates from an area closer to Concepción del Uruguay, Province of Entre Ríos, Argentina, called H-20, were used in this study.

Key words: Concrete, Quality control, Uniaxial resistance compression, Ripening.

1. INTRODUCCIÓN

Ha sido una práctica muy generalizada en Argentina, usar la fórmula de Ross, que fue establecida para los cementos suizos y para hormigones elaborados y curados en laboratorio (Fava, 1948).

Otros investigadores, europeos y americanos (Bach, Graff, Hummel, etc), han definido diversas fórmulas también, para determinar la resistencia del hormigón a compresión en una edad avanzada, partiendo de ensayos a corto plazo (Hummel, 1966). En todos los casos las formulas dependen entre otras variables, del tipo de cemento usado. Cada investigador ha procurado hacer intervenir en sus ecuaciones las múltiples variables influyentes en la calidad, partiendo de la relación agua-material cementicio, calidad y tipo de cemento, tipo de áridos, temperatura ambiente, medios tecnológicos de producción etc.

Algunos países como España, incluye en su instrucción EHE (Instrucción española del Hormigón Estructural), en su art.30.4b, una tabla con valores estimativos de la resistencia a la compresión a la edad de "j" días en relación con la resistencia a los 28 días. (IEHE, 2008). En la actualidad, la composición de los cementos argentinos, han variado mucho, siendo aún mayor el desfase entre las curvas de Ros y los otros investigadores europeos y americanos y las que surgen con los cementos argentinos. (Hummel, 1966). Debido a ello, Vialidad Nacional Argentina, en el Pliego de Especificación Técnica Particular, del Control de Hormigones para Obras de Arte Mayores, en su art.10 dice "No es válido retrotraer o proyectar valores de resistencia de probetas de distintos hormigones con fórmulas (p/ej. Ross) para la verificación del cumplimiento de exigencias de Pliego, debiendo utilizarse a estos fines y para los estudios estadísticos, únicamente resultados de probetas ensayadas a la edad de diseño. El uso de ecuaciones queda restringido a la aplicación estimativa interna del laboratorio y siempre será preferible y conveniente, confeccionar curvas de variación de las resistencias con la edad para cada tipo de hormigón empleado"(VNA, 2015).

Las oficinas técnicas de los fabricantes de cemento en la Argentina, han estudiado detalladamente el comportamiento de los hormigones realizados con sus cementos, incluso las variaciones existentes entre los hormigones elaborados con cementos de las diversas plantas con que cuenta cada empresa, reflejando en ello la variación de los componentes del cemento, según sea la zona del país. El problema radica, en que todos estos estudios, son guardados a la luz del general de los Usuarios y solo son informados a sus clientes, a través de las asesorías técnicas ofrecidas por las empresas productoras de cemento. Por todo lo cual, existe un gran desconocimiento sobre estos estudios y es justamente la intención de este trabajo, desarrollar las herramientas para poder retrotraer la resistencia a compresión del hormigón, medida a diferentes edades, a la especificada a los 28 días y utilizada convencionalmente a nivel mundial, en este caso para el cementos CPC 40 y áridos de la zona de Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

2. DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA

Para llevar a cabo el estudio propuesto se trabajó fundamentalmente desde el campo experimental y con los resultados obtenidos a partir de allí, aplicando la teoría matemática, se utilizaron sistemas estadísticos y metodologías numérico-computacional. Se realizaron un total de 30 series de probetas. Cada serie estuvo compuesta por un total de trece probetas de hormigón. De estas trece probetas, una se usó para la rotura a tracción

(Método brasileiro). Las restantes doce, se usaron para determinar los valores de resistencia a compresión a los 3, 7, 14, 28, 45 y 60 días, haciendo roturas dobles y tomando la media aritmética de los valores de rotura.

En total, se elaboraron y ensayaron trescientas noventa (390) probetas. De esta manera, los valores de resistencia a compresión determinados a los 3, 7, 14, 28, 45 y 60 días, resultaron del promedio de dos resultados, teniendo la precaución de cumplir con la normativa que especifica no superar el valor de rotura de cada probeta individualmente, el 15% de la media aritmética de ambos valores.

Estas primeras treinta series de probetas, se elaboraron con cemento portland compuesto (CPC 40) Marca Loma Negra de la planta de Olavarría y fueron dosificadas según las recomendaciones del reglamento (C.I.R.S.O.C.201, 2005) inicialmente como H-20 para una relación agua material cementicio de 0,5, asentamiento de 8 cm. El hormigón se elaboró en el Laboratorio de Ing. Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay, dependiente de la Universidad Tecnológica Nacional.

2.1 Dosificación

A partir de la información y parámetros base detallados anteriormente, se procedió con las tareas requeridas para el cálculo racional de la mezcla, vale decir muestreo, caracterización de áridos y cemento, y dosificación mediante el método del Instituto de Cemento Portland Argentino (ICPA), disponible en internet, de uso libre.

Tabla 1: características determinadas de los materiales utilizados

Materiales	Densidad relativa [g/cm³]	Tamaño Máximo	Módulo de Finesa	Absorción [%]
Cemento	3,08			
Arena	2,5		1,53	0,198
Canto Rodado	2,56	³ / ₄ "(19mm)		1,17

Tabla 2: detalle de la dosificación utilizada.

Material	Volumen (m³)	Peso (Kg)
Agua	0.168	168
Cemento	0.109	336
Canto Rodado	0.506	1295
Arena	0.217	542
Total	1	2341

3. VALORES Y CURVAS DE CADA SERIE

Por cada serie, se confeccionaron, diversas planillas y gráficos, a saber:

3.1 Planilla de elaboración y ensayos a compresión y tracción:

En cada una de estas planillas, se registró la siguiente información (Tabla 2):

- ✓ Número de la serie,
- ✓ Fecha de elaboración de la serie,
- ✓ Numeración de cada probeta, de 1 a 6, en función de los días de rotura. Esta diferenciada la probeta que rompió a tracción a 28 días,
- ✓ Edad de rotura (3, 7, 14, 28, 45 y 60 días),

- ✓ Fecha teórica de rotura,
- ✓ El asentamiento en centímetros,
- ✓ La fecha efectiva de la rotura,
- ✓ Los valores de rotura en la prensa hidráulica y en la Máquina de ensayos Universales Shimatzu en toneladas, tanto para las roturas a compresión, como para el ensayo a tracción,
- ✓ Los valores a compresión, son la media aritmética de los valores en cada día de rotura,
- ✓ Y por último, los valores de rotura de cada probeta en Mpa.

3.2 Gráfico de la curva tensión deformación:

Para cada una de las treinta series, se graficó la curva de la evolución de la resistencia en el tiempo. En el eje de abscisas se representa el tiempo transcurrido, de 0 a 60 días. En el eje de las ordenadas, se representa la tensión de rotura de las probetas en Mpa.

A continuación se muestra el modelo de tabla usado, en este caso correspondiente solo a los valores y gráficos obtenidos para la serie I:

Tabla 3: Valores de elaboración y ensayos a compresión de serie I

SERIE	FECHA ELABORACION	PROBETA N°	DIAS DE ROTURA	FECHA TEORICA DE ROTURA	ASENTAMIENTO (Cm)	FECHA DE ROTURA	CARGA ROTURA (Tn)	ROTURA COMPRESIÓN Mpa	ROTURA TRACCION Mpa
I	14/03/2016	1	3	Jueves 17/03	8,5	Jueves 17/03	30,32	16,84	
		2	7	Lunes 21/03		Lunes 21/3	37,72	20,94	
		3	14	Lunes 28/03		Lunes 28/3	44,36	24,63	
		4	28	Lunes 11/04		Lunes 11/04	49,94	27,73	
		5	45	Jueves 28/04		Jueves 28/04	53,54	29,73	
		6	60	Viernes 13/05		Viernes 13/05	56,31	31,27	
		Tracción	28	Lunes 11/04		Lunes 11/04	20		

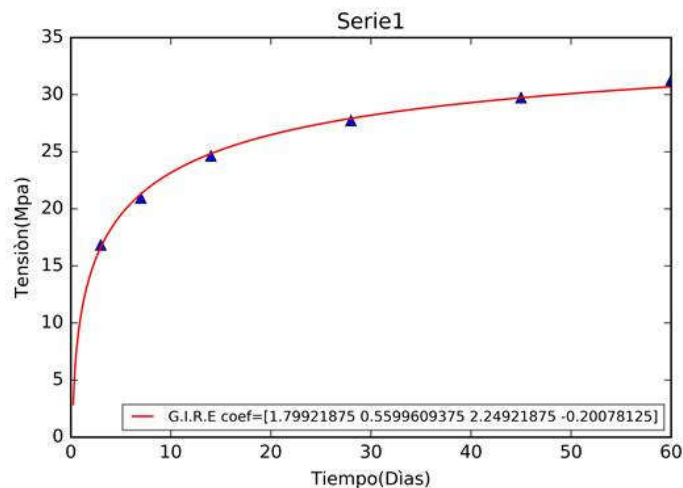


Figura 1: Curva tensión de rotura – edad. Serie I

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los valores resultantes de las treinta series ejecutadas, se calcularon los resultados finales de los ensayos a los días pre-determinados y se los tabula. (Tabla 4).

Tabla 4: Valores de tensión característica

DIAS DE ROTURA	TENSION MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K	TENSION CARACTERISTICA O ESPECIFICADA Mpa
3	16,60	2,62	1,28	13,25
7	22,44	2,19	1,28	19,64
14	25,86	1,90	1,28	23,43
28	28,09	2,00	1,28	25,52
45	29,36	2,13	1,28	26,63
60	30,16	2,17	1,28	27,38

4.1 Función propuesta

Con los valores finales de la tensión característica o especificada de la planilla N° 2, se determina la curva de la “Evolución de la Resistencia del hormigón en el tiempo” y la fórmula matemática que la expresa.

Para iniciar con el ajuste de la curva, se propone una función exponencial que rijan este tipo de funciones y que su comportamiento sea lógico con los datos experimentales obtenidos.

La función exponencial propuesta, tiene cuatro constantes y es la ecuación (1):

$$\sigma = \sigma_{28} \frac{a(d+t)^b}{c+(d+t)^b} \quad (1)$$

Para encontrar los coeficientes “a, b, c y d,” de mejor ajuste a la curva de puntos experimentales, se utilizó el programa PYTHON, con las librerías libres NUMPY y MATPLOTLIB. Obteniéndose como resultados los valores mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5: Valores finales obtenidos para los cuatro coeficientes.

Coefficientes	Valores (Curva final)
a	1,1375
b	0,83125
c	2,0625
d	-1,06875
delta	0,015625
desv	0,116892641
iteracion	4
step	0,003125

4.2 Curva resultante

La curva resultante obtenida a partir de este trabajo, que expresa la evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo para un CPC 40, es la siguiente:

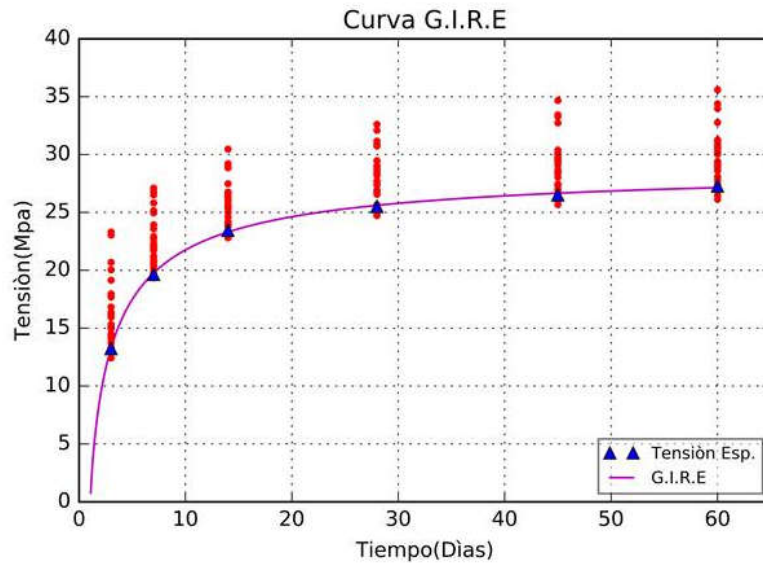


Figura 2: Curva evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, realizado con cemento CPC 40, para los resultados obtenidos.

En el gráfico se puede apreciar la curva de la evolución de la resistencia en el tiempo y para cada día de rotura (3, 7, 14, 28, 45 y 60 días), los treinta (30) valores de las treinta series, que permitieron la obtención de la misma.

Se observa que la mayoría de los valores individuales están por encima de la curva y solo algunos valores por debajo, pero estos, nunca superan el 10% (3 ensayos). Esto confirma la estimación estadística adoptada, al tomar una cobertura de la curva de Gauss del 90%.

4.3 Fórmula obtenida para la evolución de la resistencia en el tiempo.

La fórmula obtenida a partir de esta primera etapa del trabajo, que expresa la evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo para un CPC 40, es la mostrada en (2).

$$\sigma_t = \sigma_{28} \frac{1,1375(-1,06875+t)^{0,83125}}{2,0625+(-1,06875+t)^{0,83125}} \quad (2)$$

Siendo:

σ_t = Tensión característica o especificada al cabo de “t” días.

σ_{28} = Tensión característica o especificada al cabo de “28” días.

t = Tiempo en “días”.

Aplicación práctica de la fórmula: Si la Tensión característica o especificada con treinta valores de ensayo, es de 25 Mpa a los 7 días, la Tensión característica o especificada a los 28 días será la mostrada en la ecuación (3):

$$\sigma_{28} = 25Mpa \frac{2,0625+(-1,06875+7)^{0,83125}}{1,1375(-1,06875+7)^{0,83125}} = 32,30 Mpa \quad (3)$$

4.4 Comparación de resultados.

La siguiente tabla, expresa la comparación entre los valores obtenidos a partir de los ensayos y los calculados con la fórmula propuesta en este trabajo. Mostrando la

aproximación alcanzada respecto a los resultados de laboratorio. En la primera columna se especifican las fechas de rotura. En la segunda, los resultados obtenidos en los ensayos. En la tercera, los valores calculados con la fórmula propuesta y por último en la cuarta, se especifican la diferencia entre ambos valores, expresados en Mpa.

Tabla 6: Comparación entre valores de ensayo y fórmula obtenida.

DIAS DE ROTURA	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN ENSAYOS [Mpa]	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN FORMULA PROPUESTA [Mpa]	DIFERENCIA ABSOLUTA [Mpa]
3	13,25	13,24	0,01
7	19,64	19,75	0,11
14	23,43	23,31	0,12
28	25,52	25,61	0,09
45	26,63	26,66	0,03
60	27,38	27,14	0,24

4.5 Comparación con las fórmulas de Ross y la propuesta en el fib Model Code 2010.

La fórmula de Ross, se expresa por la siguiente ecuación

$$\sigma_t = \sigma_{28} \frac{a t^{2/3}}{b + t^{2/3}} \quad (5)$$

Para hormigón de cemento Portland Normal los coeficientes: a = 1,36 y b = 3,91

La FIB (Federación Internacional del Hormigón), propone una fórmula de la evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, que se expresa de la siguiente manera.

$$\sigma_t = \sigma_{28} * e^{s \left(1 - \sqrt[2]{\frac{28}{t}}\right)} \quad (6)$$

Siendo: σ_t : Tensión característica o especificada al cabo de “t” días,
 σ_{28} : Tensión característica o especificada al cabo de “28” días,
t : Tiempo en “días”,
s : Coeficiente = 0,16.

A continuación se presenta un cuadro comparativo, donde se expresan los valores determinados por el grupo G.I.R.E. con el CPC 40 de Loma Negra, y los determinados por Ross para cemento portland normal y FIB Model Code.

Tabla 7: valores comparativos entre fórmula propuesta, la de Ross y fib Model Code.

DIAS DE ROTURA	SEGÚN FORMULA PROPUESTA [MPa]	SEGÚN FORMULA DE ROSS Para cemento portland normal [MPa]	SEGÚN FIB MODEL CODE [MPa]
3	13,24	12,09	18,43
7	19,75	16,84	21,78
14	23,31	20,82	23,97
28	25,61	24,46	25,61
45	26,66	26,61	26,49
60	27,14	27,75	26,94

Del análisis de los diversos valores, se confirma la hipótesis inicial ya que los valores determinados con la fórmula de Ross para cemento portland normal, ampliamente usada en el país, no se ajusta si se usa cemento CPC 40.

Es evidente que la curva de evolución de la resistencia en el tiempo del CPC 40, toma valores elevados a los pocos días de comenzado el fragüe y luego se vuelve prácticamente asintótica pasados los 28 días.

Esto demuestra además, el cambio en la composición de los componentes de CPC 40 comparado con el Cemento Portland Normal.

El cemento CPC 40, es un cemento que brinda mayor seguridad en obra, ya que en un tiempo relativamente corto alcanza altas resistencia, lo cual favorece a partir del proceso de curado, en el desmoldado, etc.

La fórmula del FIB Model Code, se aproxima ajustadamente con los resultados obtenidos a partir de la fórmula propuesta en este trabajo, siendo sus valores, sensiblemente mayores previo a los 28 días, y menores pasada esta edad.

4.5 Comparativa de los resultados obtenidos a partir de las fórmulas propuesta, la de ROSS y la presentada en el F.I.B. Model Code.

Se muestran, en la Figura 3, las diferentes curvas obtenidas a partir de los resultados y la comparativa entre las curvas obtenidas a partir de la fórmula propuesta, la de Ross y la dada por F.I.B. Model Code.

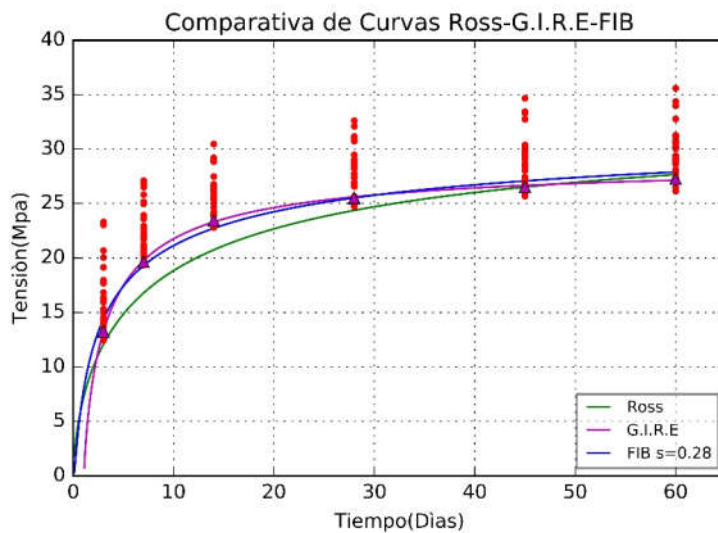


Figura 3: Curvas comparativas entre las formulas: propuesta a partir de este trabajo, la de Ross y la del F.I.B.

5. ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE ESTA ETAPA

Se calcularon, para todas las series, las desviaciones de los valores determinados teóricamente con la fórmula propuesta y los obtenidos en los ensayos a las diferentes edades.

Estos cálculos fueron tabulados, registrándose en las columnas y por series, los valores de rotura a las diferentes edades en MPa, los valores que debería alcanzar cada serie a los veintiocho días, según cada edad de rotura. Y a continuación se consignó la diferencia en MPa entre el valor teórico dado por la fórmula propuesta a los 28 días y el valor real de rotura a esa edad. En algunos casos se obtuvieron resultados con signos negativos, esto se debió a que los valores de ensayo, fueron menores a los valores teóricos, calculados por fórmula y viceversa.

Se analizaron todas las series, y en la Tabla 8 se muestran las mayores y menores desviaciones individuales obtenidas del análisis total, según los días de rotura.

Por ejemplo a los 3 días, la dispersión máxima, se encuentra en la serie VII con un -32,88 % de desviación. Esto significa que esta serie rompió a los 28 días un 32,88 % por debajo del valor teórico que debía dar aplicando la fórmula.

La desviación mínima, le corresponde a la serie XVI, con un +21,01% de desviación. Esto significa que esta serie a los tres días, rompió un 21,01% por arriba del valor teórico que debía dar aplicando la fórmula.

De todos estos valores, las desviaciones más peligrosas son las “máximas”, ya que significa que en la realidad, se obtienen valores menores a los 28 días, de los teóricos calculados.

Tabla 8. Desviaciones individuales, máximas y mínimas.

DIAS DE ROTURA	SERIE	DESVIACION EN % MAXIMA Y MINIMA
3,00	VII	-32,88
	XVI	21,01
7,00	VIII	-16,58
	XII	13,91
14,00	IV	-8,09
	XXIV	6,19
45,00	XXX	-3,74
	X	5,85
60,00	I	-5,68
	X	5,30

En base a los resultados obtenidos, se puede afirmar que pretender ensayar probetas a los tres días, con mínimo de tres valores como pide el reglamento, y proyectar su resistencia a los 28 días, no es recomendable, según la importancia de la obra en cuestión ya que puede haber diferencias por debajo de las calculadas de hasta un 33,55%, para las condiciones aquí planteadas. A partir de los 14 días, las diferencias, no son tan

significativas y se podría realizar la proyección, considerando siempre estas posibles diferencias.

Por último, a medida que el número de ensayos se incremente y se acerquen a treinta, las diferencias disminuyen tendiendo a hacerse nulas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer en primer lugar a las autoridades de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, por su apoyo sin el cual no se hubiese podido desarrollar esta investigación, a las empresas Hosifa Constructora S.A., Traza S.A., JCB Construcciones y Lambert Hermanos, por el aporte en equipamientos y en materiales imprescindibles para este trabajo. Y muy especialmente al Ingeniero Héctor Retamal por sus asesoramientos.

7. BIBLIOGRAFÍA

(Fava, 1948), Fava A.S.C. (1948), *Resistencia de rotura a la compresión en función de la relación agua-cemento y la edad*, Instituto del Cemento Portland Argentina (ICPA), Argentina.

(Hummel, 1966), Hummel H., (1966), *Prontuario del Hormigón*. Editorial Técnicos Asociados.

(IEHE, 2008), Ministerio de Fomento. EHE. (2008), *Instrucción de Hormigón Estructura EHE-08l*. Ed. Centro de Publicaciones de la Secretaría Técnica del Ministerio de Fomento. Madrid.

(VNA, 2015). Pliego de Especificaciones Técnicas Particular - Control del Hormigones para Obras de Arte Mayores-Vialidad Nacional Argentina. Available: <http://www.vialidad.gov.ar/puentes>. [Citado 10 Marzo de 2015].

(C.I.R.S.O.C.201, 2005) CIRSOC 201-2005. *Reglamento argentino de estructuras de hormigón*, Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles, Argentina.

CURRÍCULUM



María Inés Schierloh. Magister en Ingeniería. Ingeniera en Construcciones. Profesora titular en la Universidad de Concepción del Uruguay, Profesora Asociada en Universidad Autónoma de Entre Ríos, Jefe de Trabajos Prácticos en Universidad Tecnológica Nacional. Directora de Proyectos en Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras.



Roberto Fabián Souchetti. Ingeniero Civil, Ingeniero en Construcciones, Gerente Regional Centro Este del Instituto Autárquico de Planeamiento y Vivienda en la Provincia de Entre Ríos, Ayudante de laboratorio en Universidad Tecnológica Nacional. Investigador en Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras.



Lázaro Damián Deusich. Ingeniero Civil, Ingeniero en TRAZA S.A., Becario de Investigación BINID en Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras.



Lautaro Joel Alza. Alumno Avanzado de Ingeniería Civil en Universidad Tecnológica Nacional. Becario de Investigación en Grupo de Investigación en Rehabilitación de Estructuras.