

ESTUDIO SOBRE VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESION EN EL TIEMPO, PARA HORMIGONES UTILIZANDO CEMENTOS ARGENTINOS Y ÁRIDOS DE LA ZONA DE CONCEPCION DEL URUGUAY - ENTRE RÍOS

Schierloh, MI*, Souchetti, RF*, Deusich, LD* y Alza, LJ*

* Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Tel/Fax: (03442) 425-541 / 423-803, Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, E3264BTD - Entre Ríos - Argentina
schierlm@frcu.utn.edu.ar; ing.souchetti@gmail.com; lazarodeusich@gmail.com;
lautaro.alza@gmail.com

Palabras claves: Hormigón, resistencia del hormigón, factores de corrección, control para hormigones.

RESUMEN

La resistencia a compresión simple y su evolución en el tiempo, es la característica mecánica más importante de un hormigón. Dicha evolución, sigue una curva tensión-tiempo de forma parabólica, comenzando en cero y aumentando con la edad, hasta hacerse asintótica. Se plantea, en este trabajo, un avance en el análisis de la relación existente entre resistencias obtenidas a diferentes edades respecto a la alcanzada a los 28 días, para hormigones elaborados y mantenidos en idénticas condiciones. A fin de corroborar el modelo propuesto en la primera etapa usando cemento CPC40, de predicción de la resistencia del hormigón a dicha edad. Empleando, en este segundo período, cemento CPF 40 argentino, una relación a/c de 0,5, hormigones H-20 ejecutados con agregados de la zona de Concepción del Uruguay, Provincia de Entre Ríos, Argentina. Las edades estudiadas fueron 3, 7, 14, 28, 45 y 60 días.

INTRODUCCIÓN

Ha sido una práctica muy generalizada en Argentina, usar la fórmula de Ros, que fue establecida para cementos suizos y para hormigones elaborados y curados en laboratorio [1].

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 [2]. 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 el 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 desfasaje entre las curvas de Ros y otros investigadores europeos y americanos, con las que surgen usando los cementos argentinos. [2]. 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. Ros) 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"[3].

La propuesta de este trabajo es desarrollar un método que nos permita predecir la resistencia del hormigón a los 28 días, partiendo de edades menores, o mayores a dicha edad., en este caso usando cementos Argentinos y áridos de la zona de Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina.

DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el estudio propuesto se siguió trabajando 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. En este nuevo período se realizaron un total de 30 series de probetas más. Cada serie estuvo compuesta por catorce probetas de hormigón. De estas, dos se usaron para la rotura a tracción por compresión diametral 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 a cada edad.

Al igual que en el período anterior, se elaboraron y ensayaron cuatrocientas veinte (420) 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 de ensayo, 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 segundas treinta series de probetas, se elaboraron con cemento portland filerizado (CPF 40) Marca Avellaneda y fueron dosificadas según las recomendaciones del reglamento (C.I.R.S.O.C.201, 2005) inicialmente como H-20 para una relación agua cemento de 0,5, asentamiento de 8 cm. El hormigón se elaboró en la planta semiautomatizada del Ingeniero Retamal.

Dosificación

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

Tabla 1: características determinadas de los materiales utilizados.

| Materiales | Densidad relativa [g/cm3] | Tamaño Máximo | Módulo de Finesa |
|--------------|---------------------------|---------------|------------------|
| Cemento | 3,08 | | |
| Arena | 2,5 | | 1,53 |
| Granza | 2,6 | | |
| Canto Rodado | 2,56 | ¾" (19mm) | |

Tabla 2: detalle de la dosificación utilizada.

| Material | Volumen (m3) | Peso (Kg) |
|--------------|--------------|-----------|
| Agua | 0.168 | 168 |
| Cemento | 0.109 | 336 |
| Canto Rodado | 0.289 | 749 |
| Granza | 0,181 | 471 |
| Arena | 0.253 | 671 |
| Total | 1 | 2395 |

Valores y curvas de cada serie

Se trabajó de igual manera que el período anterior, es decir, por cada serie, se confeccionaron, diversas planillas y gráficos [4].

A continuación se muestra el modelo de tabla usado, en este caso correspondiente a la serie XXIX F.

Tabla 3: Valores de elaboración y ensayos a compresión de serie XXIX F.

| FECHA ELABORACION | PROBETA N° | DIAS DE ROTURA | FECHA TEORICA DE ROTURA | ASENTAMIENTO (Cm) | FECHA DE ROTURA | CARGA ROTURA (1) (Tn) | CARGA ROTURA (2) (Tn) | TENSIÓN COMPRESION (1) MPa | TENSIÓN COMPRESION (2) MPa |
|-------------------|------------|----------------|-------------------------|-------------------|-----------------|-----------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|
| 07/11/2017 | 1 | 3 | Viernes 10/11 | 8 | Viernes 10/11 | 34,87 | 32,57 | 19,36 | 18,08 |
| | 2 | 7 | Martes 14/11 | | Martes 14/11 | 41,45 | 40,81 | 23,02 | 22,66 |
| | 3 | 14 | Martes 21/11 | | Martes 21/11 | 47,72 | 48,51 | 26,50 | 26,94 |
| | 4 | 28 | Martes 05/12 | | Martes 05/12 | 54,51 | 49,33 | 30,27 | 27,39 |
| | 5 | 45 | Viernes 22/12 | | Viernes 22/12 | 54,36 | 54,62 | 30,18 | 30,33 |
| | 6 | 60 | Sabado 06/01 | | Sabado 06/01 | 57,92 | 52,44 | 32,16 | 29,12 |
| | Tracción | 28 | Martes 05/12 | | Martes 05/12 | 19,87 | 21,3 | | |

| T.C. (1) RESPECTO DE LA T.C.F (%) | T.C. (2) RESPECTO DE LA T.C.F (%) | CARGA ROTURA PROM. (Tn) | TENSIÓN COMPRESIÓN FINAL MPa | ROTURA TRACCION MPa |
|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|------------------------------|---------------------|
| 3,41 | -3,41 | 33,72 | 18,72 | |
| 0,78 | -0,78 | 41,13 | 22,84 | |
| -0,82 | 0,82 | 48,12 | 26,72 | |
| 4,99 | -4,99 | 51,92 | 28,83 | |
| -0,24 | 0,24 | 54,49 | 30,26 | |
| 4,97 | -4,97 | 55,18 | 30,64 | |
| | | 20,59 | | 2,86 |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los valores resultantes de las treinta series ejecutadas, se calcularon los valores finales de los ensayos a los días pre-determinados y se los tabuló. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4: Valores de tensión característica.

| Días de Rotura | Tensión Media MPa | Desviación Estándar | Factor k (para n-1) | Tensión Característica o Especificada MPa |
|----------------|-------------------|---------------------|---------------------|---|
| 3 | 17,14 | 2,19 | 1,28 | 14,34 |
| 7 | 23,75 | 2,14 | 1,28 | 21,01 |
| 14 | 27,32 | 1,98 | 1,28 | 24,79 |
| 28 | 30,34 | 2,32 | 1,28 | 27,36 |
| 45 | 31,95 | 2,98 | 1,28 | 28,13 |
| 60 | 33,07 | 3,14 | 1,28 | 29,05 |

Con los resultados finales de la tensión característica o especificada de la Tabla 4, se determinó la curva de la “Evolución de la Resistencia del hormigón en el tiempo” y la fórmula matemática que la expresa.

Se trabajó de igual manera que con las primeras 30 series usando CPC 40 y se adoptó la ecuación de ajuste de la curva propuesta para la primer etapa [4], una ecuación exponencial que rige este tipo de funciones y que su comportamiento fue lógico con los datos experimentales obtenidos.

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

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

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”.

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 abiertas NUMPY y MATPLOTLIB. Obteniéndose como resultados los valores mostrados a continuación:

$$a=1,15, b= 0,75, c=1,85, d= -1,20$$

La fórmula del grupo G.I.R.E., que expresa la evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo para un cemento filerizado CPF 40, es la siguiente:

$$\sigma_t = \sigma_{28} \frac{1,15(-1,20 + t)^{0,75}}{1,85 + (-1,20 + t)^{0,75}}$$

Ej.: Si la Tensión característica o especificada con treinta valores de ensayo para un hormigón con cemento CPF 40 es de 25 MPa a los 7 días, la Tensión característica o especificada a los 28 días será:

$$\sigma_{28} = 25 \text{ MPa} \frac{1,85 + (-1,20 + 7)^{0,75}}{1,15(-1,20 + 7)^{0,75}} = 32,50 \text{ MPa}$$

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 5: Comparación entre valores de ensayo y fórmula obtenida.

| Días de Rotura | Tensión Característica Según Ensayos [MPa] | Tensión Característica Según Fórmula [MPa] | Diferencia Absoluta [MPa] |
|----------------|--|--|---------------------------|
| 3 | 14,34 | 14,36 | 0,02 |
| 7 | 21,01 | 21,05 | 0,04 |
| 14 | 24,79 | 24,71 | 0,08 |
| 28 | 27,36 | 27,19 | 0,17 |
| 45 | 28,13 | 28,38 | 0,25 |
| 60 | 29,05 | 28,94 | 0,11 |

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

La fórmula de Ross, se expresa por la siguiente ecuación:

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

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.

$$\sigma_t = \sigma_{28} * e^s \left(1 - \sqrt[2]{\frac{28}{t}} \right) \quad (3)$$

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 = 0,25.

A continuación se muestra un cuadro comparativo, donde se expresan los valores determinados en este trabajo, usando, en este caso, cemento CPF 40 de Avellaneda, comparados con los determinados por Ros para cemento portland normal y FIB Model Code.

Del análisis de los diversos valores, se confirma, al igual que en el período anterior (4), la hipótesis inicial ya que los valores determinados con la fórmula de Ros para cemento portland normal, ampliamente usada en el país, no se ajusta si se usa cemento CPF 40.

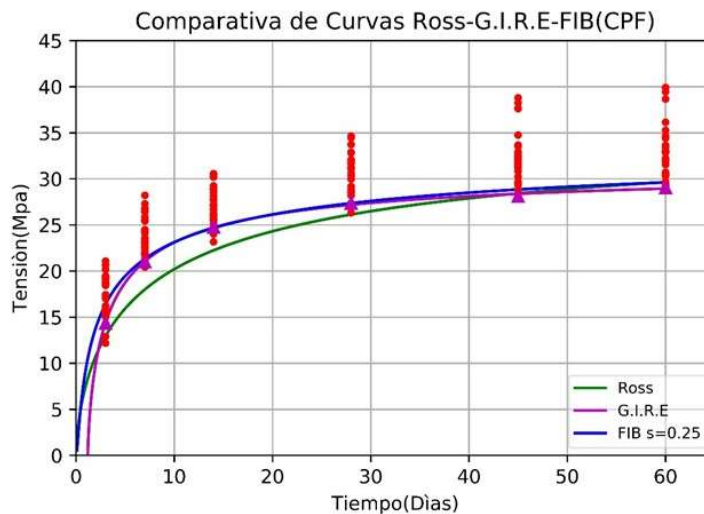
Es evidente que la curva de evolución de la resistencia en el tiempo tanto del CPC como del CPF 40, toma valores elevados a los pocos días de comenzado el fragüe y luego se vuelve prácticamente asintótica pasados los 28 días.

Tabla 6: Valores comparativos entre fórmula propuesta, la de Ros y fib Model Code.

| DÍAS DE ROTURA | SEGÚN FORMULA GRUPO G.I.R.E. MPa | SEGÚN FORMULA DE ROSS Para cemento portland normal | SEGÚN FIB MODEL CODE |
|----------------|----------------------------------|--|----------------------|
| 3 | 14,36 | 12,92 | 16,37 |
| 7 | 21,05 | 17,99 | 21,31 |
| 14 | 24,71 | 22,24 | 24,67 |
| 28 | 27,19 | 26,13 | 27,36 |
| 45 | 28,38 | 28,42 | 28,84 |
| 60 | 28,94 | 29,65 | 29,62 |

Esto demuestra así mismo, el cambio en la composición de los componentes de ambos cementos: CPC y CPF 40 comparado con el Cemento Portland Normal.

Figura 1: Curvas comparativas de los resultados obtenidos a partir de la fórmula propuesta, por el grupo G.I.R.E. la de Ros y la dada por el fib Code.



Ambos son cementos que brindan 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.

Al igual que en el estudio anterior, se observa que la fórmula dada en el 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.

La fórmula del FIB Model Code, se aproxima ajustadamente a 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.

Se muestran, en la Figura 1, las diferentes curvas obtenidas a partir de los resultados y la comparativa entre las curvas obtenidas a partir de la fórmula propuesta, la de Ros y la dada por F.I.B. Model Code.

ANÁLISIS Y CONCLUSIONES DE ESTA ETAPA

La fórmula propuesta en este trabajo, resulta del proceso de ensayar treinta (30) series de probetas, según lo requieren las normas actuales.

Para cantidades de series ensayadas mayores a treinta (30), la desviación de los valores de ensayo obtenidos, respecto de los valores teóricos que deberían dar aplicando la fórmula se hacen cada vez más despreciables, a medida que ampliamos el número de ensayos.

Para cantidades de series ensayadas menores a treinta (30), la desviación que se puede encontrar, entre los valores reales de rotura y los valores teóricos resultados de aplicar la fórmula, se incrementa a medida que nos acercamos a resultados individuales de ensayos de probetas.

Estadísticamente, se necesitan un mínimo de tres valores de rotura para proyectar valores de resistencia a los 28 días.

Para ello, se toman las 30 series ensayadas. En cada fecha esto es a los 3, 7, 14, 45 y 60 días, se proyecta la resistencia que debería obtenerse aplicando la fórmula propuesta. De todas las series ensayadas, se toman, para cada día de ensayo, las tres series que presentan mayor porcentajes de desvío, hacia arriba (positivo) o hacia debajo (negativo) de la curva teórica de rotura. Con ello se determinan las desviaciones mayores que pueden suceder para tres series.

La Tabla 7, resume este concepto para el hormigón con cemento CPF 40.

Tabla 7: Desviaciones individuales, máximas y mínimas

| Días de Rotura | Series | Desviación en % Máxima y Mínima |
|----------------|---------------------|------------------------------------|
| 3,00 | XIX, XX, XXIV | -23,66 |
| | II, VI, X | 39,57 |
| 7,00 | XXIII, XVIII, XXIII | -9,48 |
| | V, VI, VII | 17,76 |
| 14,00 | XVIII, XXVI, XXVII | -4,6 |
| | II, III, V | 9,99 |
| 45,00 | I, III, IV | -6,55 |
| | XIII, XVIII, XX | 3,52 |
| 60,00 | I, III, XX | -6,50 |
| | XIII, XIV, XVIII | 3,21 |

Los valores negativos, muestran que los teóricos obtenidos a partir de la fórmula propuesta, están por encima de los valores de ensayo y viceversa.

Las normativas vigentes y los investigadores del tema en general, consideran que resultados con desviaciones superiores al 15% no se deben considerar. Esto indica que ensayar probetas a edades menores a siete días y pretender proyectar su resistencia a 28 días, es insostenible estadísticamente. Para edades iguales o mayores a siete días, si se considera factible proyectar resistencias futuras. Este concepto, es compartido por la gran mayoría de los investigadores del tema.

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 su asesoramiento continuo, aporte de áridos y planta hormigonera.

REFERENCIAS

- [1] FAVA A.S.C., "Resistencia de rotura a la compresión en función de la relación agua-cemento y la edad", Instituto del Cemento Portland Argentina (ICPA), Argentina, 1948.
- [2] HUMMEL H., "Prontuario del Hormigón". Editorial Técnicos Asociados, 1966.
- [3] Vialidad Nacional Argentina, "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].
- [4] Schierloh, MI et al. "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". Anales CONPAT2017, Asunción de Paraguay, 2017.