

PROCEDIMIENTO PARA LA OBTENCIÓN DE FÓRMULAS DE AJUSTE SOBRE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESION EN EL TIEMPO

Schierloh M. I., Souchetti R.F., Deusicha LD.

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Tel/Fax: (03442) 425-541 / 423-803 int.162, Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, E3264BTD - Entre Ríos - Argentina

schierlm@frcu.utn.edu.ar; ing.souchetti@gmail.com; lazarodeusich@gmail.com

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados alcanzados a partir de un proyecto de investigación desarrollado en la UTN-FRCU, con el objeto de obtener fórmulas que permitan predecir la resistencia especificada del hormigón a 28 días, a partir de resultados experimentales obtenidos en diferentes edades.

Con los valores finales de las tensiones características o especificadas obtenidas experimentalmente, se determinaron curvas de la "Evolución de la Resistencia del hormigón en el tiempo" y se propusieron fórmulas matemáticas que las expresan.

Para iniciar con el ajuste de las curvas, se propuso una función exponencial que rigiera este tipo de funciones y cuyo comportamiento fuera lógico con los datos experimentales obtenidos. Las fórmulas planteadas que definen la predicción de la resistencia del hormigón en el tiempo fueron, finalmente, comparadas con los resultados obtenidos y propuestos por otros autores.

ABSTRACT

The present work shows the results achieved in a research project developed in the UTN-FRCU in order to obtain benefits that allow to predict the specific resistance of the concrete in 28 days from experimental results obtained in different ages.

With the final values of the characteristic or specified tensions, the curves of the "Evolution of the resistance of the concrete in time" were determined experimentally and the mathematical formulas that they express were proposed.

To begin with the adjustment of the curves, an exponential function was proposed that governs this type of functions and whose behavior was logical with the experimental data obtained. The proposed formulas that define the prediction of the strength of the concrete over time were, finally, compared with the results obtained and proposed by other authors.

1-INTRODUCCION:

La resistencia a compresión simple y su evolución en el tiempo, es la característica mecánica más importante de un hormigón. Dicha evolución en el tiempo, sigue una curva tensión-tiempo, comenzando en cero y aumentando con la edad, hasta hacerse asintótica. Las variables que la afectan son:

- 1-Calidad y cantidad de los materiales componentes del hormigón,
- 2-Metodo de elaboración, colocación y curado del hormigón,
- 3-Acción del entorno o maduración (temperatura, humedad y agentes químicos,
- 4-Edad de hormigón y
- 5-Método de ensayo (forma y dimensiones de la probeta, velocidad de carga, etc)

2 – ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL TEMA

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

Investigadores, europeos y americanos (Bach, Graff, Hummel, etc) [2], han determinado diversas fórmulas también, para calcular la resistencia del hormigón a compresión en una edad avanzada, partiendo de ensayos a corto plazo

En la actualidad, la composición de los cementos argentinos, ha 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.

3 – DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA:

Se realizaron un total de 30 series de probetas, siguiendo las normas estadísticas para, de esta manera, validar la tarea de este tipo de estudios.

En cada serie, se realizaron un total de catorce probetas de hormigón. De estas catorce probetas, dos se usaron para la rotura a tracción por compresión diametral [3]. Las restantes doce, se usaron para determinar los valores de resistencia a los 3, 7, 14, 28, 45 y 60 días, haciendo roturas dobles y tomando la media aritmética de los valores de rotura [4] [5] [6].

En total, se elaboraron y ensayaron cuatrocientos veinte (420) probetas

De esta manera, los valores de resistencia determinados a los 3,7, 14, 28,45 y 60 días, resultaron el promedio de los dos valores de resistencia resultantes, teniendo la precaución de cumplir con la normativa que sugiere no superar el valor de rotura de cada probeta individualmente, el 15% de la media aritmética de ambos valores.

Las treinta series de probetas, se ejecutaron con cemento portland compuesto (CPC 40) Industria Nacional y fueron dosificadas según C.I.R.S.O.C. 201/2005 [7], 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.

4 - VALORES Y CURVAS DE CADA SERIE:

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

A – PLANILLA DE ELABORACION Y ENSAYOS A COMPRESION:

En cada una de estas planillas, se pueden observar una serie de columnas con datos tales como:

- Número de la serie
 - Fecha de elaboración de la serie
 - Numeración de cada serie doble de probetas, de 1 a 6, en función de los días de rotura. Esta diferenciada la probeta que rompió a flexión a 28 días con tracción por compresión diametral.
 - Días de rotura (3, 7, 14, 28, 45 y 60 días)
 - Fecha teórica de rotura
 - El asentamiento en cm, que dio el cono de Abrams
 - La fecha efectiva de la rotura
 - Los valores de rotura en la prensa hidráulica y en la Máquina de ensayos Universales Shimadzu en toneladas, tanto para las roturas a compresión, como para el ensayo a flexión o método brasilero.
- Los valores a compresión, son la media aritmética de los valores en cada día de rotura.
- Los valores de rotura de cada probeta en Mpa.

B – GRAFICO DE LA CURVA TENSION DEFORMACION:

Para cada serie, se ha graficado 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 da la probeta en Mpa

SERIE I:

A modo de ejemplo, en la Tabla 1 se adjunta solo los valores obtenidos para la serie I y en la Figura 1 el gráfico tensión – tiempo de dicha serie.

FECHA ELABORACION	PROBETA N°	DIAS DE ROTURA	CARGA ROTURA (1) (tn)	CARGA ROTURA (2) (tn)
05/06/2017	1	3	29,86	28,47
	2	7	49,75	46,5
	3	14	53,15	56,93
	4	28	62,11	59,47
	5	45	68,31	69,5
	6	60	71,4	72,29

Tabla 1. Valores de elaboración y ensayos a compresión de serie I.

ROTURA COMPRESIO N (1) Mpa	ROTURA COMPRESIO N (2) Mpa	DIFERENCI A (1) (%)	DIFERENCI A (2) (%)	CARG A ROTURA (Tn)	ROTURA COMPRESIO N Mpa
16,58	15,81	2,38	-2,38	29,17	16,19
27,62	25,82	3,38	-3,38	48,13	26,72
29,51	31,61	-3,43	3,43	55,04	30,56
34,49	33,02	2,17	-2,17	60,79	33,75
37,93	38,59	-0,86	0,86	68,91	38,26
39,64	40,14	-0,62	0,62	71,85	39,89

Tabla 1 (Cont.). Valores de elaboración y ensayos a compresión de serie I

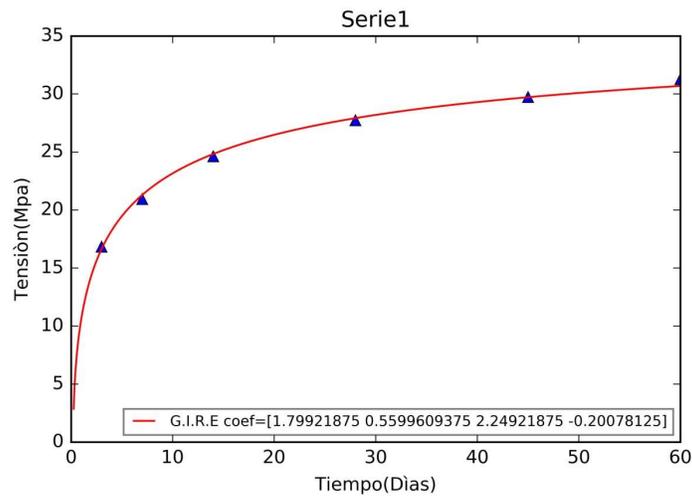


Figura1. Curva tensión de rotura - edad serie I

5 - VALORES FINALES :

Con los valores resultantes de las treinta series ejecutadas, se calculan los valores finales de los ensayos a los días pre-determinados, los cuales se vuelcan en la siguiente tabla.

DIAS DE ROTURA	TENSION MEDIA Mpa	DESVIACION ESTÁNDAR	FACTOR K	TENSION CARACTERISTICA O ESPECIFICADA Mpa
3	16,60	2,66	1,28	13,19
7	22,44	2,22	1,28	19,59
14	25,86	1,93	1,28	23,39
28	28,09	2,04	1,28	25,48
45	29,36	2,17	1,28	26,58
60	30,16	2,21	1,28	27,33

Tabla 2. Valores de tensión característica.

6 – FUNCION EXPONENCIAL:

Con los valores finales de la tensión característica o especificada de la planilla N° 2, se determinó 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 propuso una función exponencial que rigiera este tipo de funciones y que su comportamiento sea lógico con los datos experimentales obtenidos.

La función exponencial propuesta, fue la misma que uso Ros (1), la cual contiene tres constantes.

$$\sigma = \sigma_{28} \frac{at^b}{c+tb} \quad (1)$$

Esta ecuación, se puede resolver por mínimos cuadrados. Al tener infinitas soluciones, el objetivo fue determinar la ecuación que se acercara a los valores de ensayo, según la precisión que se consideró necesaria (dos dígitos, tres dígitos, etc).

Estas ecuaciones son muy laboriosas para resolverlas a mano, por ello se recurrió a la informática.

Para encontrar los coeficientes “a, b y c,” de mejor ajuste a la curva de puntos experimentales, se utilizó el programa PYTHON, con las librerías libres NUMPY y MATPLOTLIB, se definió un vector denominado “coef”, que contuviera a los 3 números (2)

$$coef = [a \ b \ c] \quad (2)$$

La mejor aproximación de la curva que se logró con la fórmula (1), fue una curva que quedó corrida o desfasada sobre el eje de las abscisas en el sentido positivo de los valores.

Para corregir este defecto, se introdujo un nuevo coeficiente (d) en el valor tiempo (t) de la fórmula, de tal manera de “traer” o “correr” la curva y hacerla coincidir con los valores

de ensayo.

La nueva fórmula propuesta fue la (3)

$$\sigma = \sigma_{28} \frac{a(d+t)^b}{c+(d+t)^b} \quad (3)$$

Para encontrar los coeficientes “a, b, c y d,” de mejor ajuste a la curva de puntos experimentales, se utilizó nuevamente el programa PYTHON, con las librerías libres NUMPY y MATPLOTLIB.

Para encontrar los coeficientes “a, b, c y d,” de mejor ajuste a la curva de puntos experimentales, se definió un vector denominado “coef”, que contuviera a los 4 números.

$$coef = [a \ b \ c \ d]$$

El método que se empleó ahora, fue darle valores predeterminados a los coeficientes a, b, c y d , y calcular la desviación con los valores de ensayo.

Estos valores, se plantearon dentro de ciertos rangos para cada uno de ellos, en función de los valores pre-supuestos que podrían resultar.

Para cada valor que se fije a los coeficientes, la función y los puntos experimentales tenían una diferencia. Esta diferencia se utilizó para determinar que curva con ciertos coeficientes ajustaba mejor (Figura 2)

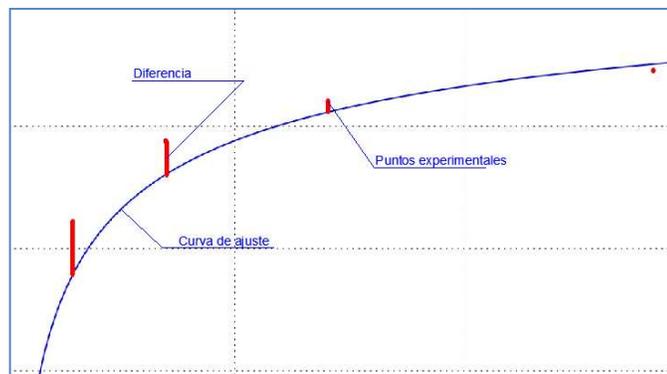


Figura 2. Puntos experimentales y curva encontrada desfasada

Para ellos se calculó la desviación de la curva encontrada y los puntos experimentales de la siguiente forma:

Se determinó la diferencia entre los valores de la curva y los datos experimentales (4)

$$\Delta(t) = \sigma(t) - \sigma_{Ensayos}(t) \quad (4)$$

Como las probetas se ensayaron a los 3, 7, 14, 28, 45 y 60 días, se tuvieron 6 diferencias para la curva (5)

$$\Delta(3), \Delta(7), \Delta(14), \Delta(28), \Delta(45), \Delta(60) \quad (5)$$

Pero estos valores podrían estar por encima o debajo de la curva, por lo que al sumarlos se podrían cancelar y el valor de desviación no sería el correcto, por esta razón se elevó al cuadrado cada una de las diferencias, de tal manera de trabajar siempre con valores absolutos (6).

$$\Delta^2 \quad (6)$$

Para obtener el promedio de estas diferencias se propuso (7)

$$\Sigma \Delta^2 / 6 \quad (7)$$

Como los números que se obtubieron fueron demasiado grandes para trabajar con ellos, se aplicó raíz cuadrada (8).

Desarrollando la formula, se vió que es la desviación estándar. (9)

$$Desviacion([a, b, c, d]) = \sqrt{\frac{\Sigma \Delta^2}{6}} \quad (8)$$

$$Desviacion([a, b, c, d]) = \sqrt{\frac{\Sigma(\sigma(t) - \sigma_{Ensayos}(t))^2}{6}} \quad (9)$$

Con la formula anterior se pudo comparar como se ajustaba la curva a los puntos de los ensayos.

El rango de valores que se les dió a los coeficientes a, b, c y d, se determinaron en función de los valores que tomaban en la fórmula de Ros y en función de valores de algunas curvas aproximadas resueltas previamente.

Para obtener esta serie de coeficiente "a, b, c y d" se partieron los rangos presupuestos en espacios iguales, teniendo en cuenta el tamaño del rango y cada cuantos partimos el intervalo, ya que de otra manera, los cálculos en la computadora llevarías varias horas.

Ejemplo:

$$0 < a < 5 \quad dA = 0.001$$

$$0 < b < 1.5 \quad dB = 0.001$$

$$0 < c < 5 \quad dC = 0.001$$

$$0 < d < 5 \quad dC = 0.001$$

Ej. Para el coeficiente "a", se propuso el rango entre 0 y 5. Como existen infinitos valores en ese rango, se le dio una partición de 0,001. O sea que se dividió el intervalo en 5000 partes.

Con esta división de rangos, el programa puede realizar todas las combinaciones posibles entre los valores de a, b, c y d y encontrar la curva de mejor ajuste.

Los rangos anteriores, supondrían generar 187.500.000.000.000 de posibles combinaciones y después se tendría que calcular el mismo número de desviaciones para

luego encontrar el mínimo, lo que con una computadora de escritorio se tardaría más de 112 hs:

$$\frac{5}{0.001} * \frac{1.5}{0.001} * \frac{5}{0.001} * \frac{5}{0.001} = 187.500.000.000.000$$

Y esta cantidad, sería solamente para obtener una precisión al tercer dígito. Si se pretendiera tenerlo al cuarto dígito, se deberían multiplicar por 10.000 las combinaciones antes mencionadas. Dada tanta complejidad, se desistió de realizar este camino que implicaba tantas combinaciones.

Finalmente se optó por escoger valores de equipartición del rango más grandes, y cuando se tienen los coeficientes con mínima desviación, se procede a afinar el rango y a afinar el tamaño de equipartición.

Ej. Para el coeficiente "a", se empieza por a_0 , el cual toma un rango $a+\delta$ y $a-\delta$, divide el rango en partes iguales de "step", se calcula la desviación y selecciona como a_1 el que mínima desviación genere. Posteriormente toma el rango $a_1+\delta/2$ y $a_1-\delta/2$, divide el rango en "step/2" y selecciona como a_2 el que genere mínima desviación. Así sucesivamente se divide en dos el rango y en 2 el "step", para ir acotando la mejor solución hasta que la diferencia entre dos desviaciones sucesiva sea menor a 0.001.

De igual manera se procedió para los otros coeficientes, ver Figura 3.

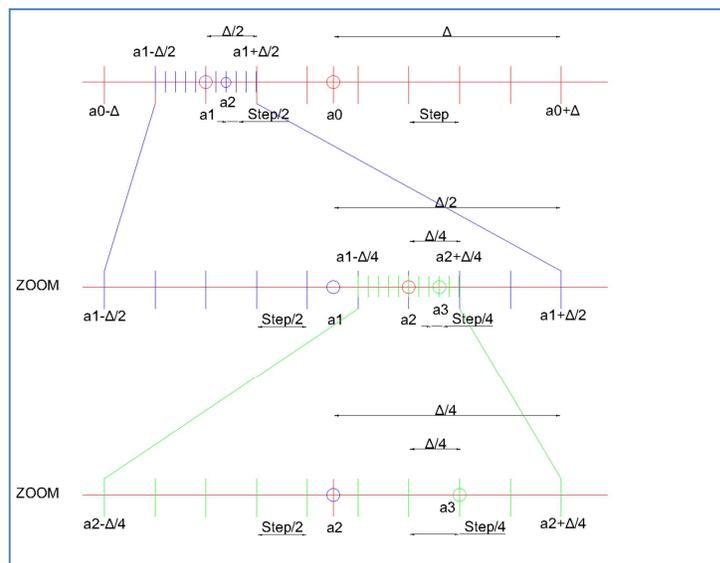


Figura 3. Equipartición de rangos

Para realizar los cálculos se utilizó Python, con las librerías abiertas numpy y matplotlib.

6.1 - CODIGO PYTHON (AJUSTE DE CURVA)

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import math
import pandas as pd
t=np.array([3,7,14,28,45,60])
serie1=np.array([16.84,20.94,24.63,27.73,29.73,31.27])
serie2=np.array([17.88,22.02,25.58,27.68,29.63,30.12])
serie3=np.array([17.91,22.74,25.64,27.66,28.38,29.28])
serie4=np.array([20.05,25.83,28.86,29.05,29.49,30.19])
serie5=np.array([14.07,20.66,23.05,24.84,25.67,26.14])
serie6=np.array([16.16,21.72,24.05,25.66,26.81,27.40])
serie7=np.array([20.70,23.94,25.53,26.79,28.05,29.06])
serie8=np.array([17.81,24.96,25.66,26.90,27.32,27.78])
serie9=np.array([16.14,22.14,23.93,25.50,26.99,28.60])
serie10=np.array([17.70,22.92,26.71,28.75,29.36,30.04])
serie11=np.array([17.97,22.94,26.77,29.45,30.21,30.54])
serie12=np.array([17.97,20.89,26.72,30.74,32.74,32.77])
serie13=np.array([15.32,21.79,25.46,27.72,29.44,30.12])
serie14=np.array([15.31,20.22,23.88,26.57,28.66,29.41])
serie15=np.array([14.24,20.40,25.01,27.38,29.08,30.21])
serie16=np.array([12.43,19.88,26.25,29.01,29.50,30.21])
serie17=np.array([15.09,21.22,24.23,26.83,27.45,28.80])
serie18=np.array([13.72,20.41,25.96,29.49,30.38,30.87])
serie19=np.array([16.37,25.16,27.49,30.91,27.38,28.08])
serie20=np.array([19.14,26.52,28.95,31.16,33.29,33.99])
serie21=np.array([14.53,19.63,22.80,24.72,26.76,27.27])
serie22=np.array([16.14,23.60,26.55,28.43,29.60,30.18])
serie23=np.array([15.95,22.75,26.67,28.81,29.89,31.16])
serie24=np.array([13.33,19.61,23.04,26.79,28.50,29.01])
serie25=np.array([23.30,26.82,29.21,32.10,33.43,34.38])
serie26=np.array([23.05,27.11,30.47,32.62,34.68,35.60])
serie27=np.array([14.97,21.88,25.34,26.95,28.45,29.41])
serie28=np.array([14.29,19.36,23.81,25.49,25.99,26.48])
serie29=np.array([14.45,22.34,26.17,28.21,29.49,30.64])
serie30=np.array([15.13,22.75,26.44,28.69,30.05,30.63])
tension=np.array([13.25,19.64,23.45,25.52,26.51,27.27])
```

```
tensionG=np.array([serie1,serie2,serie3,serie4,serie5,serie6,serie7,serie8,serie9,serie10, serie11, serie12, serie13, serie14, serie15, serie16, serie17, serie18, serie19, serie20, serie21, serie22, serie23, serie24, serie25, serie26, serie27, serie28, serie29, serie30, tensión])
```

```
data2={'iteración':{'a': 0,'b': 0,'c': 0,'d': 0, 'delta': 0, 'step': 0,'desv':0}}
```

```
v=-1
```

```
for ser in np.arange(0,31):
```

```
    j=-1
```

```
    coef0=np.array([1,0.7,1.8,-1])
```

```
    step=0.1
```

```
    delta=0.5
```

```
    dif=1.0
```

```
    sant=100
```

```
    tension=tensionG[ser]
```

```
    print('Serie'+str(ser))
```

```
    while dif>0.001:
```

```
        coef=np.array([0,0,0,0])
```

```
        a=np.arange(coef0[0]-delta,coef0[0]+delta,step);
```

```
        b=np.arange(coef0[1]-delta,coef0[1]+delta,step);
```

```
        c=np.arange(coef0[2]-delta,coef0[2]+delta,step);
```

```
        d=np.arange(coef0[3]-delta,coef0[3]+delta,step);
```

```
        v=v+1
```

```
        j=j+1
```

```
        #print(j)
```

```
        h=-1
```

```
        s=np.array([])
```

```
        for ia in a:
```

```
            for ic in c:
```

```
                for ib in b:
```

```
                    for idd in d:
```

```
                        h=h+1
```

```
                        cuaternion=np.array([ia,ib,ic,idd])
```

```
                        coef=np.vstack((coef,cuaternion))
```

```
                        desvRos=(tension-
```

```
tension[3]*(coef[h][0]*(t+coef[h][3])**coef[h][1]/(coef[h][2]+(t+coef[h][3])**coef[h][1]))**2
```

```

s=np.hstack((s,math.sqrt(np.sum(desvRos)/6.0)))
min=np.argmin(s)
coef0=coef[min]
#print(np.shape(s))
#print(coef0)
print(s[min])
ss=s[min]
delta=delta/2
step=step/2
dif=np.abs(ss-sant)
#print(step)
#print(delta)
sant=ss
data2['Serie'+str(ser)]={'iteracion':j,'a': coef0[0],'b': coef0[1],'c': coef0[2],'d': coef0[3],
'delta': delta, 'step': step,'desv':s[np.argmin(s[1:np.shape(s)[0]])]}
print(coef0)
print(data2)
table = pd.DataFrame(data2)
writer = pd.ExcelWriter('PythonSeries.xlsx')
table.to_excel(writer, 'Resultados')
writer.save()

```

6.2 – RESULTADO (CURVA DE AJUSTE PARA CADA SERIE)

	Serie1	Serie2	Serie3	Serie4	Serie5
a	1,65234375	1,359375	1,15	1,05	1,13125
b	0,3984375	0,459375	0,65	1,0125	0,6375
c	2,421875	1,59375	1,3	1,05	1,03828125
d	-0,703125	-0,8125	-0,8	-1,0125	-
delta	0,00195313	0,0078125	0,0625	0,03125	0,00195313
desv	0,15464155	0,203711	0,12778151	0,32913445	0,08496082
iteracion	7	5	2	3	7
step	0,00039063	0,0015625	0,0125	0,00625	0,00039063

Tabla 3. Resultado coeficientes, curvas 1 a 5.

	Serie6	Serie7	Serie8	Serie9	Serie10
a	1,159375	1,45625	1,0234375	1,278125	1,109375
b	0,6015625	0,2625	1,29375	0,475	0,8109375
c	1,0671875	1,0375	1,2421875	1,1625	1,7
d	-	-	-	-	-
	1,4921875	-1,084375	1,0921875	-1,5921875	-0,50625
delta	0,00390625		0,00390625		0,00390625
	5	0,0078125	5	0,00390625	0,00390625
desv	0,15217228		0,38933738		0,20343996
	8	0,2474337	8	0,52707572	0,20343996
iteracion	6	5	6	6	6
step	0,00078125		0,00078125		0,00078125
	5	0,0015625	5	0,00078125	0,00078125

Tabla 4. Resultado coeficientes, curvas 6 a 10

	Serie11	Serie12	Serie13	Serie14	Serie15
a	1,1265625	1,4765625	1,203125	1,4125	1,26875
b	0,775	0,484375	0,6859375	0,5	0,6375
c	1,853125	2,55625	1,8140625	2,1	2,0875
d	-0,30625	-0,45625	-1,1046875	-0,9125	-1,225
delta	0,00390625	0,00390625	0,00390625	0,015625	0,015625
desv	0,24146097	0,83425345	0,14936236	0,11317108	0,23856287
iteracion	6	6	6	4	4
step	0,00078125	0,00078125	0,00078125	0,003125	0,003125

Tabla 5. Resultado coeficientes, curvas 11 a 15.

	Serie16	Serie17	Serie18	Serie19	Serie20
a	1,125	1,2	1,17421875	0,9375	1,234375
b	0,878125	0,6	0,76328125	1,2625	0,52265625
c	2,59375	1,5	2,446875	1,15	1,1703125
d	-1,346875	-1,4	-1,203125	-1,63125	-1,6210938
delta	0,00390625	0,125	0,00195313	0,0078125	0,00195313
desv	0,5637702	0,25887007	0,43486117	1,18223655	0,40710272
iteracion	6	1	7	5	7
step	0,00078125	0,025	0,00039063	0,0015625	0,00039063

Tabla 6. Resultado coeficientes, curvas 16 a 20.

	Serie21	Serie22	Serie23	Serie24	Serie25
a	1,275	1,14453125	1,2	1,325	1,503125
b	0,6	0,6359375	0,6	0,575	0,315625
c	1,85	1,09296875	1,4	2,225	1,4625
d	-0,775	-1,8710938	-1,65	-1,3375	-0,315625
delta	0,0625	0,00195313	0,0625	0,03125	0,0078125
desv	0,46338727	0,1085467	0,22652696	0,21922923	0,12268318
iteracion	2	7	2	3	5
step	0,0125	0,00039063	0,0125	0,00625	0,0015625

Tabla 7. Resultado coeficientes, curvas 21 a 25.

	Serie26	Serie27	Serie28	Serie29	Serie30
a	1,45	1,2015625	1,1	1,2078125	1,1546875
b	0,3625	0,6078125	0,925	0,59375	0,71796875
c	1,45	1,328125	2,25	1,365625	1,55625
d	-0,5875	-1,7421875	-0,55	-1,9890625	-1,5398438
delta	0,03125	0,00390625	0,0625	0,00390625	0,00195313
desv	0,17089311	0,24435783	0,37306068	0,20208968	0,08079556
iteracion	3	6	2	6	7
step	0,00625	0,00078125	0,0125	0,00078125	0,00039063

Tabla 8 – Resultado coeficientes, curvas 26 a 30.

6.3 - RESULTADO DE LA CURVA DE TENSION ESPECIFICA PARA LAS TREINTA (30) SERIES

Coeficientes	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

Tabla 9. Resultado coeficientes finales

Se observa, que con cuatro interacciones se resolvió el problema para tres decimales.

7 – FORMULA EVOLUCION DE LA RESISTENCIA EN EL TIEMPO DEL GRUPO G.I.R.E.:

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

$$\sigma_t = \sigma_{28} \frac{1,1375(-1,06875+t)^{0,83125}}{2,0625+(-1,06875+t)^{0,83125}} \quad (10)$$

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”

Ej: 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:

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

8 – CURVA RESULTANTE:

La curva propuesta, que expresa la evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo para un CPC 40 y áridos de la zona, es la mostrada en la Figura 4.

En el grafico 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).

De esta manera se confirma la estimación estadística adoptada, al tomar una cobertura de la curva de Gauss del 90%.

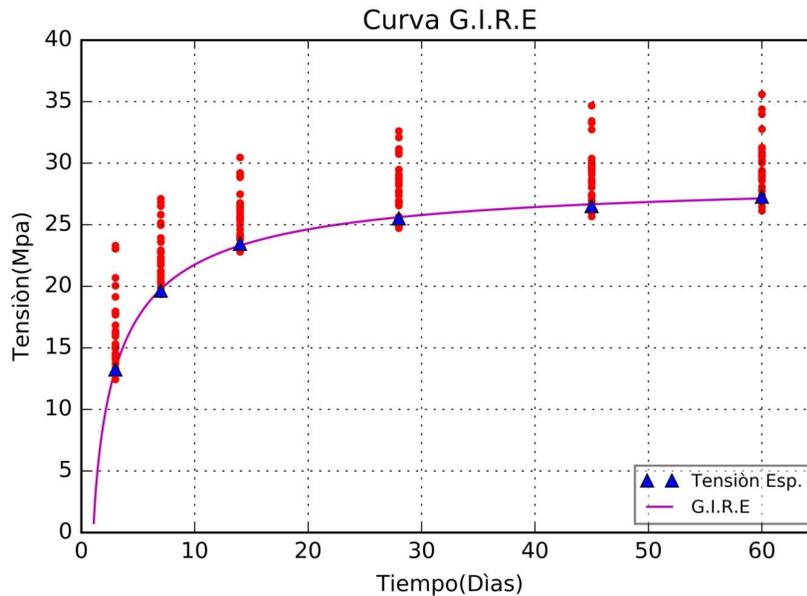


Figura 4. Curva evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, realizado con cemento CPC 40 y áridos de la zona, Según grupo G.I.R.E.

9 – COMPARACION ENTRE VALORES DE ENSAYO Y FORMULA DEL GRUPO G.I.R.E.:

La siguiente tabla, expresa la comparación entre los valores obtenidos con los ensayos y los expresados con la fórmula propuesta en este trabajo.

A partir de esta comparación se puede ver claramente, la aproximación obtenida con dicha fórmula y los ensayos de laboratorio

En la primera columna se expresan los días de rotura.

En la segunda columna, los valores obtenidos con los ensayos.

En la tercera columna, los valores obtenidos con la fórmula propuesta.

En la cuarta columna, se expresa la diferencia entre ambos valores, expresados en Mpa

DIAS DE ROTURA	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN ENSAYOS Mpa	TENSION CARACTERISTICA SEGÚN FORMULA GRUPO GIRE Mpa	DIFERENCIA ABSOLUTA Mpa
3	13,19	13,21	0,02
7	19,59	19,72	0,13
14	23,39	23,27	0,12
28	25,48	25,57	0,09
45	26,58	26,62	0,04
60	27,33	27,09	0,24

Tabla 10. Comparación entre valores de ensayo y formula del grupo G.I.R.E.

Se observa que la aproximación lograda es casi absoluta, lo cual demuestra la efectividad del método empleado.

10 – COMPARACION CON LA FORMULA DE ROS Y FIB MODEL CODE DEL AÑO 2010:

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

$$\sigma_t = \sigma_{28} \frac{a t^{2/3}}{b + t^{2/3}} \quad (11)$$

Para hormigón de cemento Portland Normal a = 1,36; 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

$$\sigma_t = \sigma_{28} * e^{s \left(1 - \sqrt[2]{\frac{28}{t}}\right)} \quad (12)$$

Siendo:

s = Coeficiente = 0,16

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

DIAS DE ROTURA	SEGÚN FORMULA GRUPO G.I.R.E. Mpa	SEGÚN FORMULA DE ROSS Para cemento portland normal	SEGÚN FIB MODEL CODE
3	13,19	12,03	18,34
7	19,59	16,75	21,71
14	23,39	20,71	23,85
28	25,48	24,33	25,48
45	26,58	26,47	26,36
60	27,33	27,61	26,80

Tabla 12. Valores comparativos entre formula G.I.R.E., formula de Ross y FIB MODEL CODE

Del análisis de los diversos valores, se confirma la hipótesis inicial de que los valores obtenidos con la fórmula de Ros para cemento portland normal, ampliamente usada en el país hasta estos días, no se ajusta correctamente si la queremos aplicar al cemento CPC 40.

Es evidente que la curva de la Evolución de la resistencia en el tiempo del CPC 40, toma valores elevados a los pocos días de comenzado el fragüe y luego se ameseta 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 CPC 40, es un cemento que brinda más seguridad en obra, comparado con los viejos cementos Normalizados, ya que en un tiempo relativamente corto, alcanza altas resistencia, lo cual favorece la seguridad en el curado del mismo, en el desmoldado, etc. Los valores obtenidos con la fórmula dada en el FIB MODEL CODE, se acercaron a los determinados con la fórmula propuesta en este trabajo por el grupo G.I.R.E., siendo sus valores, mayores a los de G.I.R.E. previo a los 28 días, pero menores a los del grupo G.I.R.E. pasados los 28 días

11- COMPARATIVA DE CURVAS G.I.R.E., ROSS Y F.I.B.:

Se adjunta un gráfico, con la comparativa entre las curvas del grupo G.I.R.E., Ross y F.I.B..

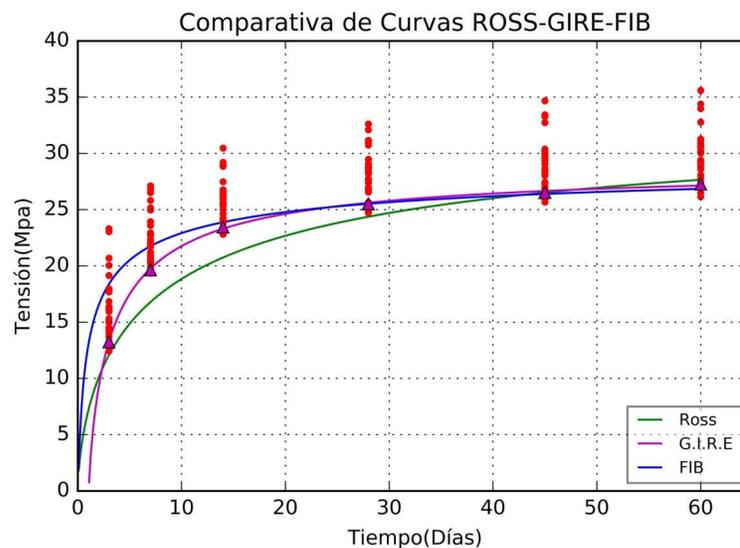


Figura 5. Curvas comparativas G.I.R.E., Ross y F.I.B.

12- COLABORADORES

Se desea nombrar a todo el equipo que trabajó en este desarrollo, además de quienes figuran como autores, han participado el Ingeniero Retamal Héctor Ricardo, quien asesora en temáticas de hormigón fresco y su tratamiento, quien, por otra parte donó los áridos para la confección del mismo. Los alumnos becarios: Lautaro Alza, Agustín Grazziani, Marcos Valiente y Fernando Tauber, que han tenido una participación valiosa

tanto en la ejecución de las probetas su manipuleo, toma de datos y confección de planillas, entre otros.

13- BIBLIOGRAFÍA

Citada:

- [1] Resistencia de rotura a la compresión en función de la relación agua-cemento y la edad- Ing.S.C.Fava - ICPA año 1948 - paper
- [2] Prontuario del Hormigón - Halfred.Hummel - Editorial Técnicos Asociados, Año 1966-libro.
- [3] IRAM 1658:95 Hormigón. Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral. Argentina.
- [4] IRAM 1534:04 Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. Argentina.
- [5] IRAM 1553:08 Hormigón de cemento. Preparación de las bases de probetas cilíndricas y testigos cilíndricos, para ensayo de compresión. Argentina.
- [6] IRAM 1546:92 Hormigón de Cemento Pórtland Método de Ensayo a Compresión.
- [7] CIRSOC 201-2005. "Reglamento argentino de estructuras de hormigón", Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles, Argentina.

Consultada:

- Instrucción española del Hormigón Estructural EHE - Año 1999
- Pliego de Especificaciones Técnicas Particular - Control del Hormigones para Obras de Arte Mayores – Vialidad Nacional Argentina.
- IRAM 1541:91 Hormigón de cemento pórtland. Hormigón fresco. Muestreo. Argentina.
- O. GIRALDO BOLIVAR I.C. Propiedades de los componentes del Hormigón Armado. Estructuras de hormigón 1. Universidad Nacional de Colombia. 2003.
- Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA). Control de calidad del hormigón. 2013
- Ing.Edgardo Becker. Cemento Portland Compuesto, Propiedades y recomendaciones de uso – Centro Técnico Loma Negra. 2000-2002
- A. Wogrin. El control estadístico de la calidad, en la técnica del hormigón – *Zement und Beton* n° 66-67 – pag. 18-25 –
- Paulo Helene. Contribuição à análise da resistência do concreto em estruturas existentes para fins de avaliação da segurança – ABECE Informa 90 , Abril 2012.