

# DESARROLLO DE LA RESISTENCIA A COMPRESION A PRIMERAS EDADES EN HORMIGONES DE ALTA RESISTENCIA

Carlos ARCOS d'H.\*

## RESUMEN

*Este trabajo presenta la experiencia en laboratorio para determinar principalmente la relación entre resistencia a compresión del hormigón y edad temprana (primeros días), y las correlaciones más importantes que se desprenden.*

*La investigación se ha restringido a las variables más significativas para hormigones de alta resistencia y particularmente para su aplicación a hormigones pretensados en cuanto a la resistencia al destensar.*

*Si bien se tabulan los resultados y se obtienen relaciones analíticas es necesario destacar que el mejor uso de la experiencia puede obtenerse con el adecuado manejo de las curvas y gráficos.*

## INTRODUCCION

De las especificaciones que se pueden mencionar para definir un hormigón, tal vez la más conocida y usual, y a la vez la más importante, es la resistencia a compresión. Se puede estimar que el éxito de una gestión constructiva y/o la aceptación de elementos de hormigón se basa en los resultados de aquélla.

La resistencia depende, para una dosificación dada, en mayor grado de los materiales, del diseño de las mezclas, colocación, curado y del control de las operaciones. Si para hormigones de resistencias medias éstos son los factores

---

\* Investigador de IDIEM.

principales, para obtener hormigones de alta resistencia, particularmente hormigones pretensados, todos ellos se hacen mucho más importantes, especialmente el tratamiento de curado, por la necesidad de resistencia a edad temprana.

Generalmente, la resistencia a compresión se especifica a edad de 28 días, pero hoy en día, es más o menos usual la especificación a edades más tempranas, y también, en algunos casos, a edades mayores. En pretensados, además de la especificación a 28 días, se exige que el hormigón tenga cierta resistencia a edad mucho menor, como ser 3, 2 días, 24 o 16 horas. En las plantas de pretensado se considera el último elemento fabricado para fijar la edad del banco de tensado. El hormigón debe ser a esa edad lo suficientemente resistente para soportar el esfuerzo a que es sometido en la puesta en tensión. Se puede decir que el destensado es en sí una puesta en servicio o una prueba de recepción del hormigón.

Las especificaciones de resistencia a compresión a 28 días de estos hormigones son usualmente no inferiores a  $350 \text{ kgf/cm}^2$ , y frecuentemente de 400, 450 y  $500 \text{ kgf/cm}^2$ , y se puede estimar que en un futuro razonable se llegue a  $600 \text{ kgf/cm}^2$ .

La especificación sobre edad al destensar se elige corrientemente por condiciones de mejor aprovechamiento de las instalaciones de las plantas de pretensado. Muchas veces, en especial cuando no se tiene laboratorio en faena, no es posible conocer por método directo la resistencia que tiene el hormigón en ese momento. Se considera de interés tener información sobre las resistencias que el hormigón puede alcanzar a edades tempranas y con este objetivo se desarrolló un trabajo experimental cuyos resultados y condiciones se exponen a continuación. Se trabajó con hormigones tradicionales y corrientes, con la sola característica de ser de alta resistencia, y realizados con métodos de fabricación y control exigentes, pero, por otra parte, de condiciones semejantes a las que son necesarias en faena para obtener un buen hormigón.

## EXPERIENCIA

### Materiales

Los áridos empleados eran de origen silíceo y forma mixta, procedentes de la planta elaboradora Sociedad Minera Arrip S.A. en Santiago, en atención a que corresponden en general a áridos de calidad y uniformidad constante. El tamaño máximo elegido fue de  $3/4''$  y la mezcla se formó combinando un árido medio (gravilla) y una arena en proporción adecuada para obtener un árido total cuya granulometría estuviera de acuerdo con la zona recomendada por la norma NCh.163.Of.77<sup>1</sup>. Esta condición se obtuvo con 42% de árido fino.

Los cementos empleados fueron los que más se usan en Santiago para obtener hormigones de alta resistencia y son:

Cemento P: Tipo portland, grado alta resistencia.

Cemento PP1: Tipo portland puzolánico, grado alta resistencia.

Cemento PP2: Tipo portland puzolánico, grado alta resistencia.

### Hormigones

Para cada cemento se tomaron tres razones agua-cemento que corresponden tres dosis por metro cúbico de hormigón elaborado, y fueron los siguientes:

razón W/C= 0.37 – dosis 550 kg/m<sup>3</sup>

razón W/C= 0.43 – dosis 450 kg/m<sup>3</sup>

razón W/C= 0.52 – dosis 350 kg/m<sup>3</sup>

Cada serie estaba formada entonces por nueve hormigones. Cada hormigón se ha repetido en seis coladas a excepción de una que se realizó siete veces (PP1-0,52). En total son 55 coladas.

La confección se realizó en betonera de eje vertical durante dos minutos, posteriormente homogeneizado en forma manual al llenar las probetas. El hormigón se vibró en mesa vibradora hasta obtener compactación completa.

El curado se llevó a efecto en cámara de laboratorio (temperatura media 20°C); desde el momento de la confección hasta 5 o 6 horas, momento en que las probetas se cubrían con arpilleras húmedas hasta el día siguiente. A las 24 horas las probetas se desmoldaban y se sumergían en agua, hasta el ensayo. Las probetas ensayadas a 24 horas no tuvieron tratamiento por inmersión en agua.

### Probetas

Para cada hormigón se confeccionaron diez probetas cúbicas de 20 x 20 x 20 cm para ensayar dos probetas compañeras a 24 horas, 2, 3, 4 y 28 días de edad. El ensayo de las probetas a edad temprana se hizo lo más cerca posible de la hora de confección. El ensayo se realizó en estado saturado superficialmente seco en una prensa LOS de 300 toneladas, con velocidad de carga de 9 mm/min.

## RESULTADOS E INTERPRETACION

Los resultados obtenidos se presentan en las curvas de las Figs. 1, 2 y 3.

Estos resultados se analizaron estadísticamente para estudiar su dispersión, el grado de confianza de los valores y diversas correlaciones entre valores de diferentes edades.

### Dispersión

Tal como era de esperar, se confirmó una tendencia general, en todos los casos, de que la variación de fabricación disminuye con la edad del hormigón. Para comparar con otros valores se ha considerado la dispersión medida, como

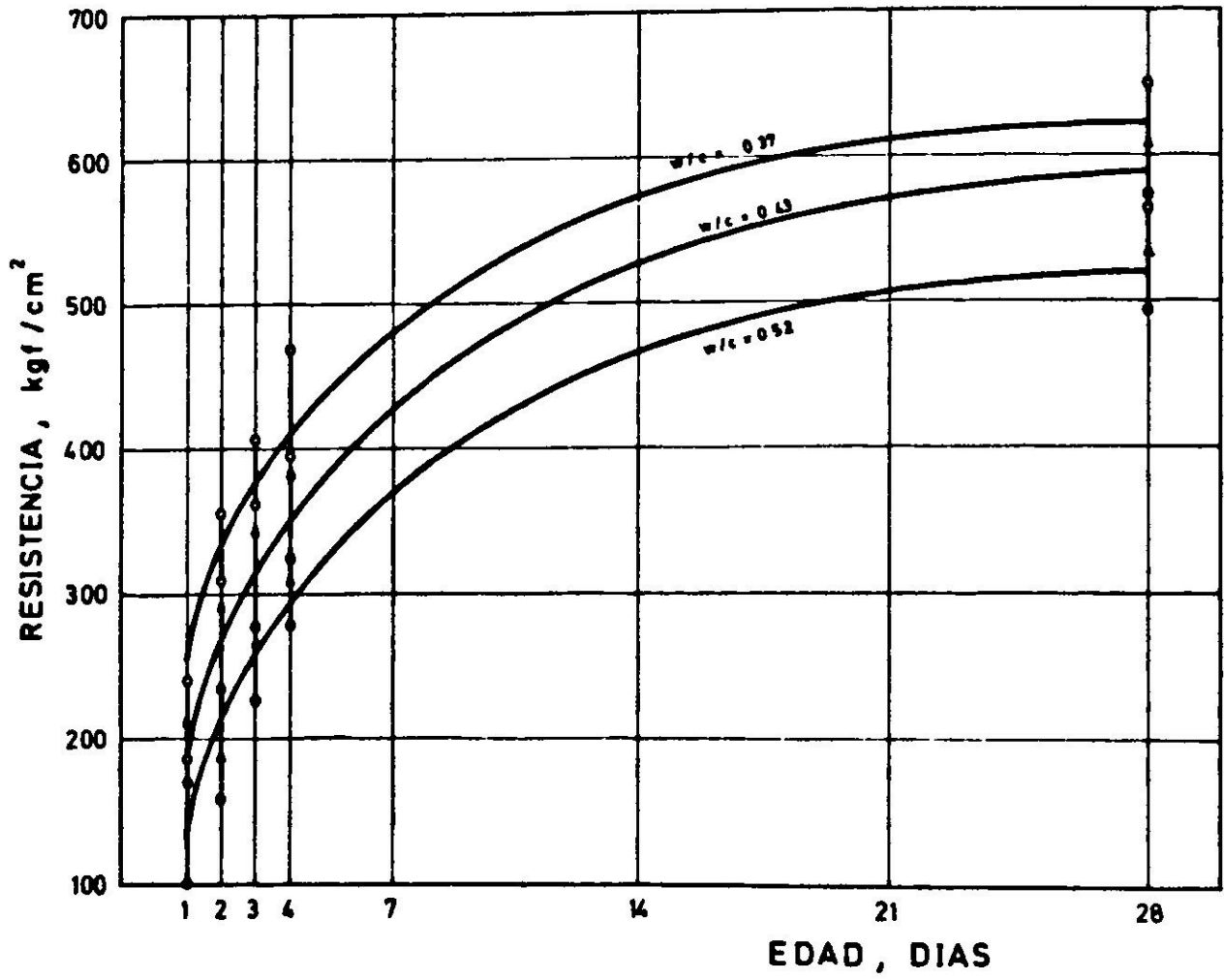


Fig. 1. Curvas de endurecimiento, cemento portland, diferentes razones W/C.

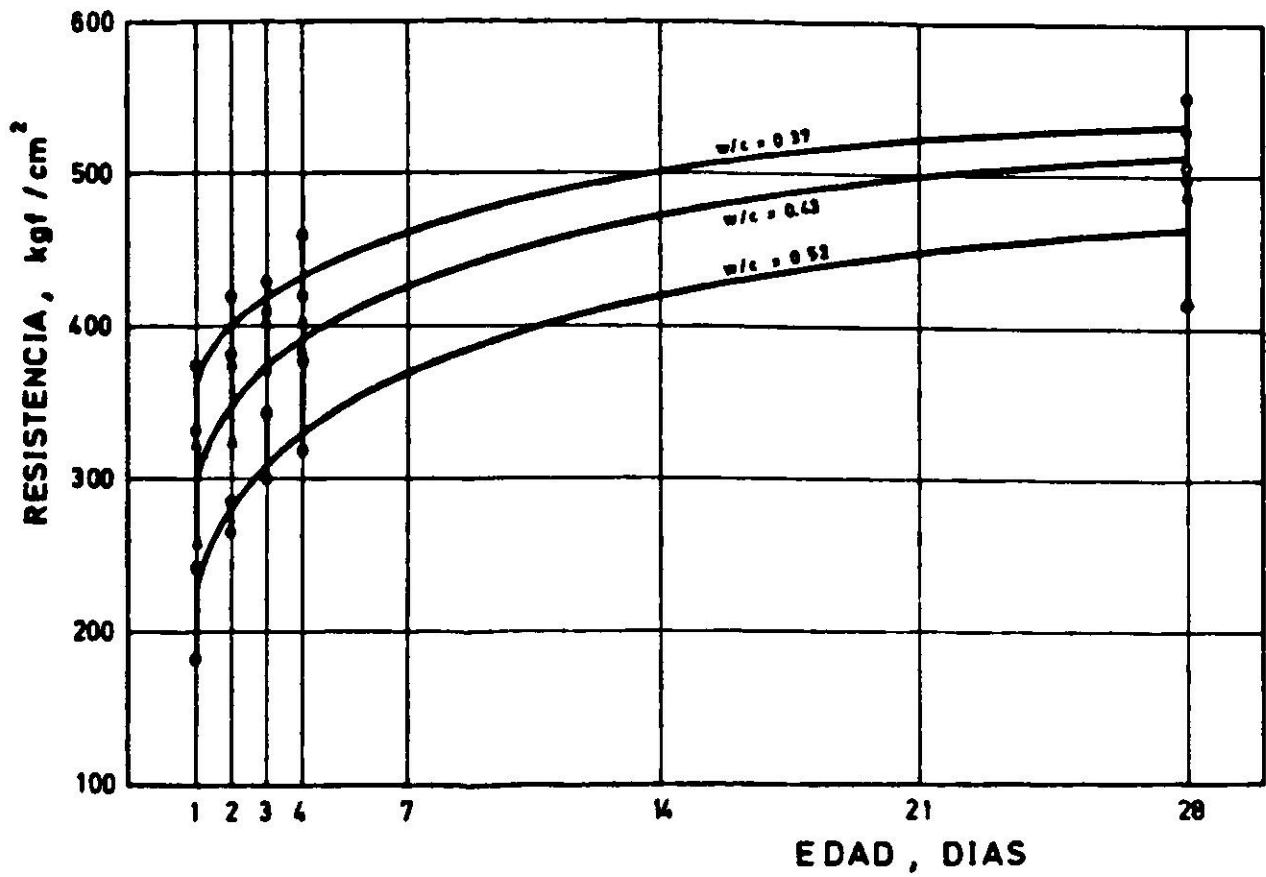


Fig. 2. Curvas de endurecimiento, cemento portland puzolánico 1, diferentes razones W/C.

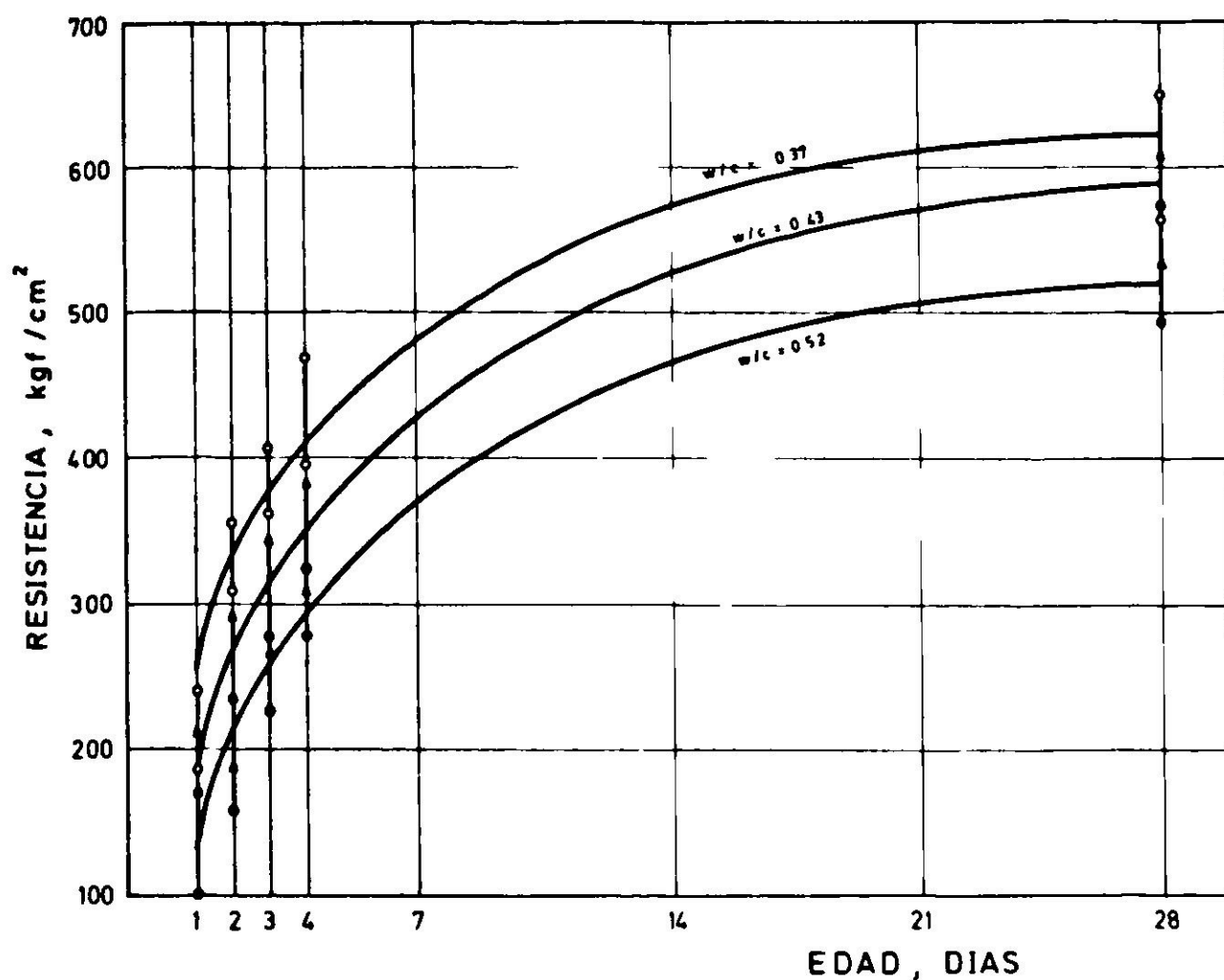


Fig. 3. Curvas de endurecimiento, cemento portland puzolánico 2, diferentes razones W/C.

coeficiente de variación, sólo para cubos ensayados a 28 días. Esta dispersión entre coladas (dispersión de fabricación) resultó de 3.3% para cemento P, 4.1% para cemento PP1 y 4.9% para cemento PP2. Corresponde en promedio a un 4.1%, lo que puede calificarse como *muy bueno*<sup>2</sup>.

La dispersión de control medida como coeficiente de variación entre cubos compañeros a diferentes edades, resultó de 3.6% para cemento P, 3.0% para cemento PP1 y 3.2% para cemento PP2. En promedio fue de 3.3%, por lo que el control de probetas compañeras puede calificarse como *bueno*<sup>2</sup>.

### Confiabilidad de los resultados

Todos los resultados experimentales han sido analizados por la prueba de Student y Fisher<sup>3,4,5</sup>, con el fin de conocer si cada uno de los tipos de hormigón pertenecen a la misma población, y no incurrir entonces en errores experimentales ajenos a la variable medida. La prueba se realizó con una probabilidad de 95% de acierto, y se ha verificado para cada tipo de hormigón considerando las coladas de resultados extremos; que son los que dan la mayor dispersión de fabricación.

Como dispersión de cubos compañeros de las muestras, se tomó el valor de la varianza correspondiente a un coeficiente de variación de 4.1%, mayor que el 3.3% promedio obtenido anteriormente. Esto hace que, por haber considerado un valor de dispersión más desfavorable, se proyecte a una aplicación mejor de resultados que se obtengan en faena.

Con lo expuesto, se ha podido deducir que todos los valores de resistencia

obtenidos en el laboratorio cumplen satisfactoriamente la prueba, por lo que se pueden mantener y lograr con ellas relaciones fidedignas, que son las que se tratarán de obtener a continuación.

### Relación entre las resistencias a compresión y las edades tempranas

La influencia de la edad sobre las propiedades del hormigón depende entre otros, del tipo de cemento, la dosis, del tratamiento de curado y de las proporciones de las componentes.

Como se ha dicho, en esta experiencia se ha variado el tipo de cemento y la razón agua-cemento o dosis.

Con los datos de esta experiencia se intentó ajustar los valores a curvas de tipo parábola cuadrática y cúbica, encontrándose en los primeros tanteos un muy mal ajuste de las relaciones. Algunos autores, entre ellos Hummel<sup>6</sup>, han logrado un buen ajuste de la relación entre la resistencia a compresión y la edad del hormigón, en edades de 3 a 28 días, en la expresión de una recta trazada con la edad en escala logarítmica y natural en la resistencia.

Por esto y por los resultados que se muestran más adelante, se estimó como mejor expresión de la relación buscada una recta del tipo:

$$R = k_1 + k_2 \log T \quad 1$$

en que:

$R$ , resistencia a compresión,  $\text{kgf/cm}^2$ .

$k_1$  y  $k_2$ , constantes que dependen del tipo de cemento y de la razón W/C o dosis.

$T$ , edad del hormigón, días.

La expresión 1 es una línea recta cuando se utiliza la variable auxiliar  $T_e = \log T$ ; y su forma natural es de una curva de tipo logarítmico.

Usando la variable auxiliar se han ajustado por el método de mínimos cuadrados, las rectas correspondientes a cada tipo de hormigón. Además, se han calculado para cada caso los límites de confianza con una probabilidad del 90%. Los resultados que expresan las constantes  $k_1$  y  $k_2$  de las relaciones buscadas se indican en la Tabla I, la que indica también los correspondientes coeficientes de correlación.

Los coeficientes de correlación de las rectas son en todos los casos mayores que 0.928, lo que indica correlaciones *muy fuertes*. Los datos se han tratado por el método de la dódima de Student<sup>3,5</sup> para determinar la significación de la correlación, encontrándose que las correlaciones *son significativas*, a un nivel del 1%.

Las expresiones de las rectas de regresión con sus límites de confianza se han dibujado en las Figs. 4, 5 y 6, en las que se muestran también los puntos correspondientes a cada resultado individual.

TABLA I

RESUMEN DE LAS EXPRESIONES QUE RELACIONAN LA RESISTENCIA A COMPRESION DEL HORMIGON ( $R = k_1 + k_2 \log T$ ) Y LA EDAD (T, DIAS)

Hormigón		Relación resistencia, edad						Coeficiente de correlación
Cemento	Razón W/C	Media		Superior		Inferior		
		K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	
Portland	0.37	428	94	452	94	404	94	0.928
	0.43	382	97	401	97	362	97	0.956
	0.52	284	125	302	125	266	125	0.976
Portland puzolánico 1	0.37	362	118	381	118	342	118	0.970
	0.43	302	145	328	145	277	145	0.965
	0.52	228	164	256	164	200	164	0.966
Portland puzolánico 2	0.37	253	255	295	255	211	255	0.969
	0.43	177	284	220	284	135	284	0.974
	0.52	130	270	159	270	100	270	0.986

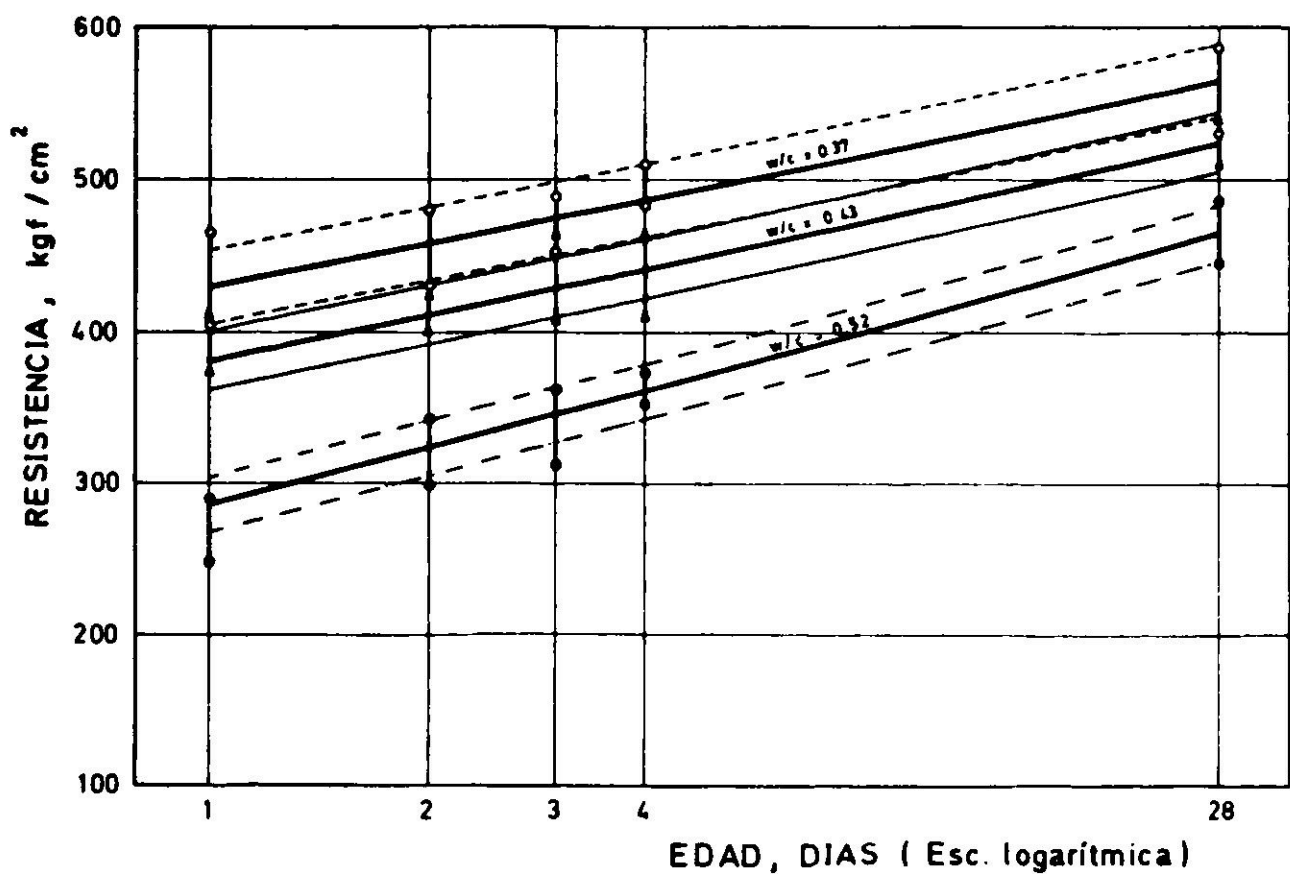


Fig. 4. Relación resistencia - edad temprana, cemento portland, diferentes razones W/C.

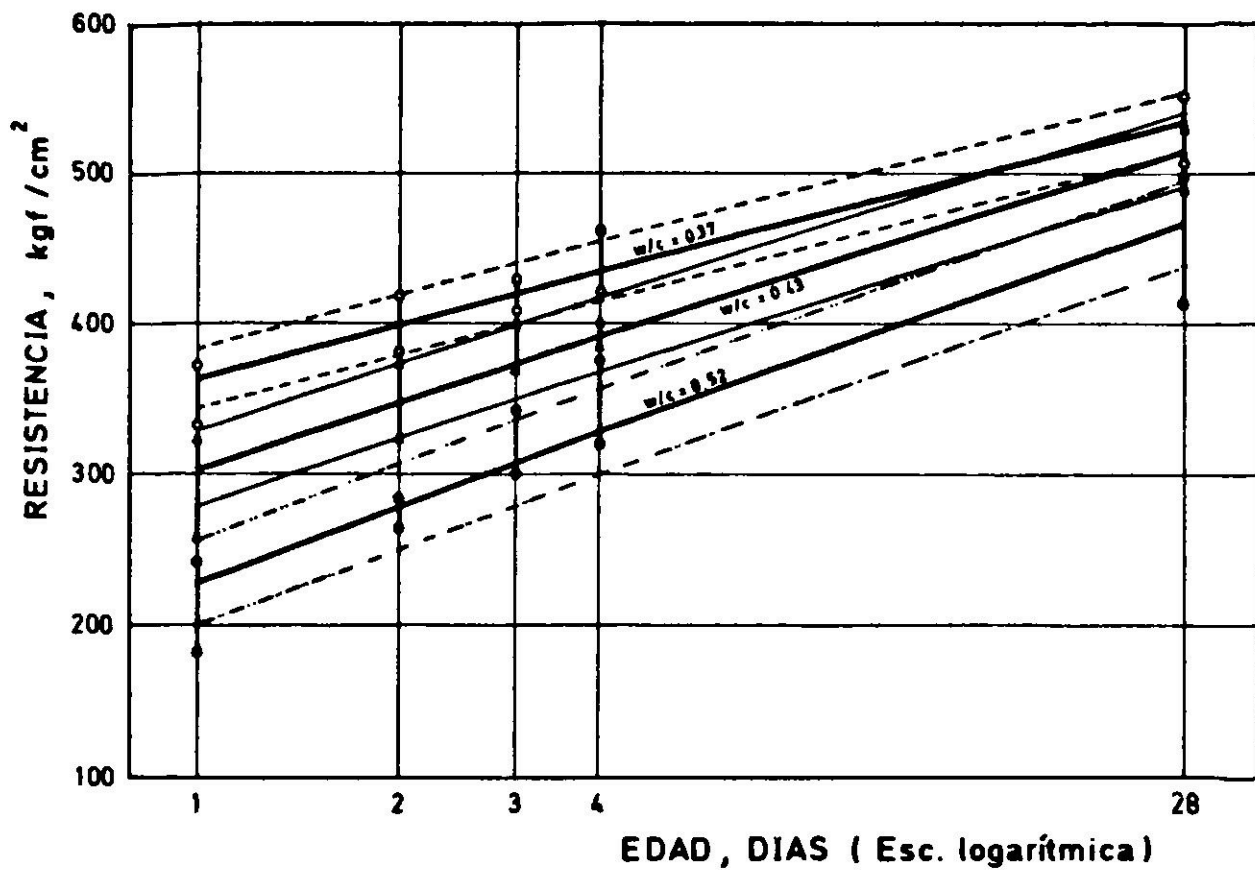


Fig. 5. Relación resistencia - edad temprana, cemento portland puzolánico 1, diferentes razones W/C.

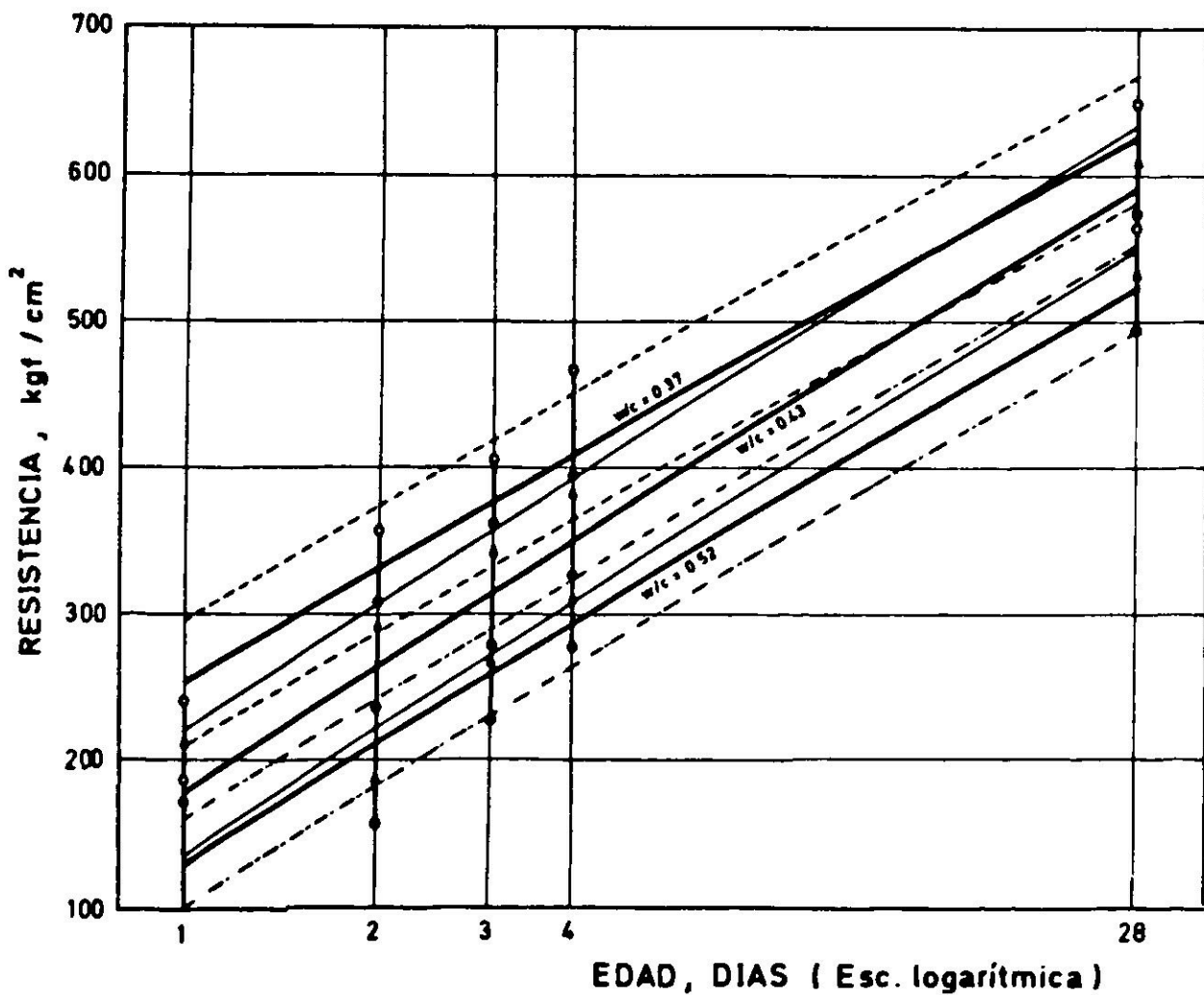


Fig. 6. Relación resistencia - edad temprana, cemento portland puzolánico 2, diferentes razones W/C.



### Relación entre la resistencia a compresión relativa a diferentes edades

En las Figs. 7 y 8 se han dibujado las relaciones para cada tipo de cemento y razón agua-cemento. Se expresan como resistencia a compresión relativa, en porcentaje de las resistencias a 28 días y 1 día. Los valores medios se muestran en la Tabla II y corresponden al promedio aritmético de los hormigones a una edad con respecto a las edades de 28 y 1 día.

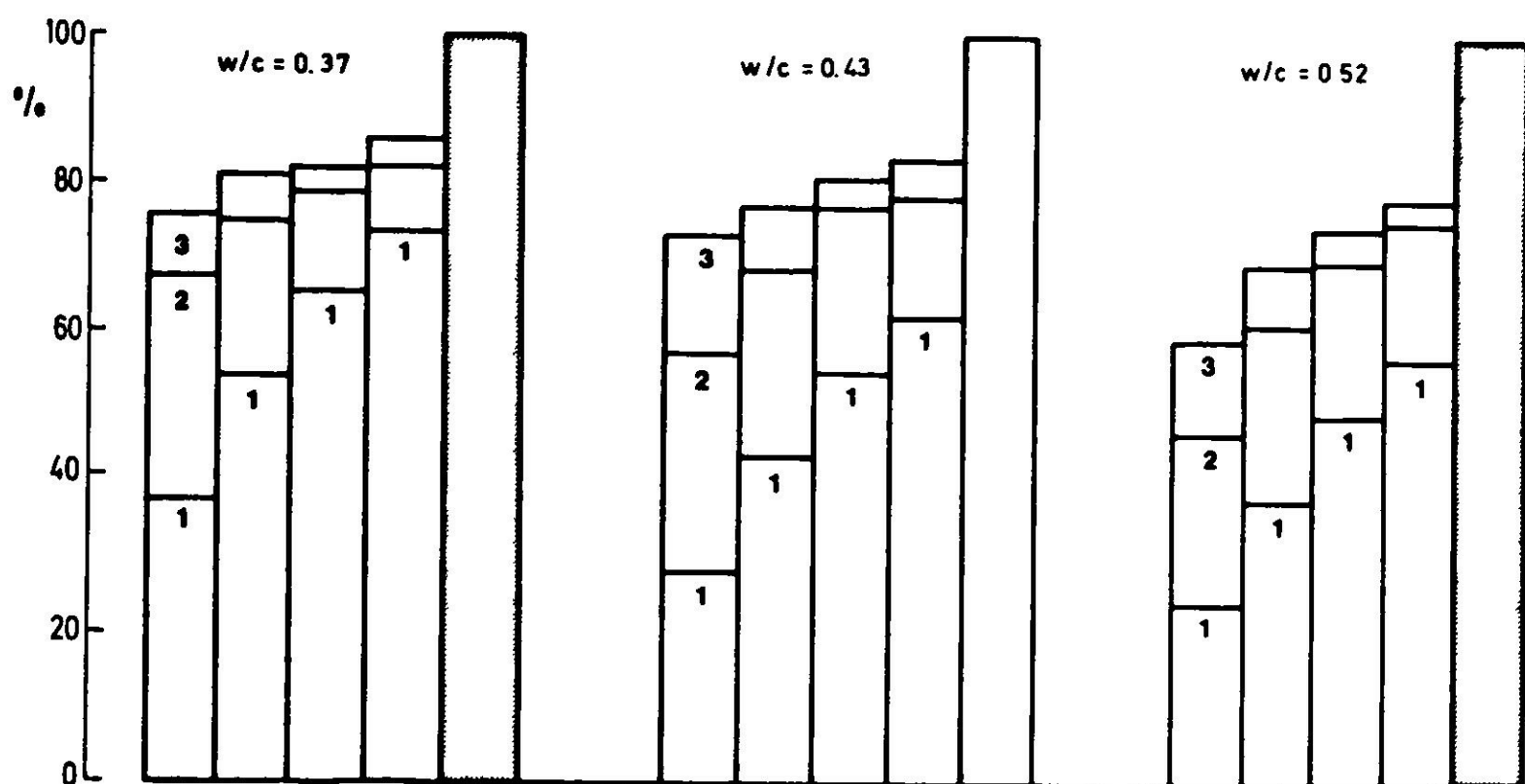


Fig. 7. Resistencia a compresión relativa a diferentes edades con respecto a la de 28 días. 1) Cemento puzolánico 2) Puzolánico 1. 3) Portland.

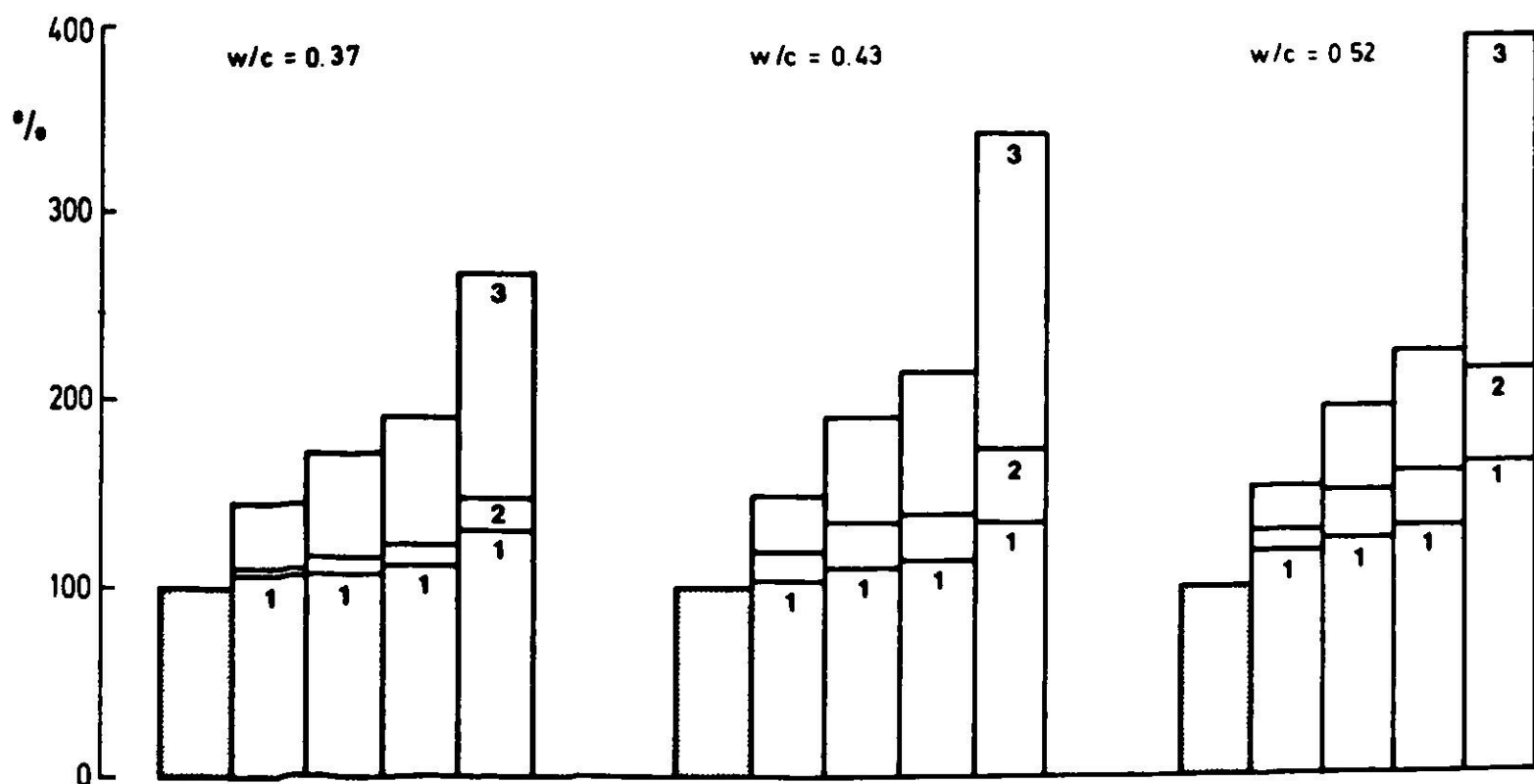


Fig. 8. Resistencia a compresión relativa a diferentes edades con respecto a la de 1 día. 1) Cemento portland. 2) Puzolánico 1. 3) Puzolánico 2.

TABLA II

RESISTENCIA A COMPRESION RELATIVA CON RESPECTO  
A LA DE 28 DIAS Y DE 1 DIA, %

Hormigón			Resistencia a la edad de, días				
Cemento	Razón W/C		1	2	3	4	28
Portland	0.37	$R_t/R_{28} \times 100$	76	81	83	86	100
		$R_t/R_1 \times 100$	100	106	109	113	131
	0.43	$R_t/R_{28} \times 100$	74	77	81	84	100
$R_t/R_1 \times 100$		100	105	109	114	135	
0.52	$R_t/R_{28} \times 100$	60	70	75	79	100	
	$R_t/R_1 \times 100$	100	117	125	131	166	
Portland Puzolánico 1	0.37	$R_t/R_{28} \times 100$	68	75	79	82	100
		$R_t/R_1 \times 100$	100	110	117	122	148
	0.43	$R_t/R_{28} \times 100$	57	69	77	78	100
$R_t/R_1 \times 100$		100	121	136	138	176	
0.52	$R_t/R_{28} \times 100$	47	61	70	75	100	
	$R_t/R_1 \times 100$	100	130	150	160	215	
Portland Puzolánico 2	0.37	$R_t/R_{28} \times 100$	38	54	65	73	100
		$R_t/R_1 \times 100$	100	144	172	193	267
	0.43	$R_t/R_{28} \times 100$	29	44	55	62	100
$R_t/R_1 \times 100$		100	149	190	214	342	
0.52	$R_t/R_{28} \times 100$	25	39	50	57	100	
	$R_t/R_1 \times 100$	100	156	196	224	394	

Correlación entre resistencias a compresión a diferentes edades tempranas y a 28 días.

La Tabla III resume las relaciones entre las resistencias a compresión de 1, 2, 3 y 4 días y la de 28 días.

En este caso se ha propuesto con el fin de simplificar las expresiones una relación lineal tipo:  $R_{28} = a + b \cdot R_t$ , en que  $R_{28}$ , resistencia a compresión a 28 días,  $\text{kgf/cm}^2$ ;  $a$  y  $b$ , constantes que dependen del tipo de cemento y de las edades;  $R_t$ , resistencia a compresión a edad temprana,  $\text{kgf/cm}^2$ .

No obstante se calcularon las relaciones en la fórmula propuesta por Piñeiro<sup>7</sup>, de la forma:  $R_t = m \cdot R_{28}^n$ , pero debido al rango de resistencias y al escaso número de valores no se produce un mejor ajuste, por lo que se ha optado por la relación lineal.

Finalmente en la Tabla IV se indican los valores de resistencias mínimas probable, media probable y máxima probable, con una probabilidad de acierto del 90% para cada hormigón.

TABLA III

RESUMEN DE LAS EXPRESIONES QUE RELACIONAN LA RESISTENCIA A COMPRESION DEL HORMIGON A DIFERENTES EDADES TEMPRANAS, VERSUS LA DE 28 DIAS

Cemento	$R_T$ vs $R_t$	Relación
Portland	$R_{28} - R_1$	$R_{28} = 284 + 0.636 R_1$
	$R_{28} - R_2$	$R_{28} = 220 + 0.751 R_2$
	$R_{28} - R_3$	$R_{28} = 187 + 0.798 R_3$
	$R_{28} - R_4$	$R_{28} = 172 + 0.800 R_4$
Portland Puzolánico 1	$R_{28} - R_1$	$R_{28} = 356 + 0.492 R_1$
	$R_{28} - R_2$	$R_{28} = 283 + 0.626 R_2$
	$R_{28} - R_3$	$R_{28} = 230 + 0.711 R_3$
	$R_{28} - R_4$	$R_{28} = 211 + 0.731 R_4$
Portland Puzolánico 2	$R_{28} - R_1$	$R_{28} = 477 + 0.516 R_1$
	$R_{28} - R_2$	$R_{28} = 419 + 0.573 R_2$
	$R_{28} - R_3$	$R_{28} = 369 + 0.615 R_3$
	$R_{28} - R_4$	$R_{28} = 365 + 0.557 R_4$

TABLA IV

RESISTENCIAS A COMPRESION MAS PROBABLES A DIFERENTES EDADES SEGUN EL TIPO DE CEMENTO Y LA RAZON AGUA-CEMENTO,  $\text{kg/cm}^2$

Cemento	Edad días	Razón Agua-Cemento								
		0.37			0.43			0.52		
		Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.	Mín.	Med.	Máx.
Portland	1	400	430	450	360	380	400	270	280	300
	2	430	460	480	390	410	430	300	320	340
	3	450	470	500	410	430	450	330	340	360
	4	460	480	510	420	440	460	340	360	380
	28	540	560	590	500	520	540	450	460	480
Portland Puzolánico 1	1	340	360	380	280	300	330	200	230	260
	2	380	400	420	320	350	370	250	280	300
	3	400	420	440	350	370	400	280	310	330
	4	410	430	450	360	390	410	300	330	350
	28	510	530	550	490	510	540	440	460	490
Portland Puzolánico 2	1	210	250	290	130	180	220	100	130	160
	2	290	330	370	220	260	300	180	210	240
	3	330	370	420	270	310	350	230	260	290
	4	360	410	450	310	350	390	260	290	320
	28	580	620	660	550	590	630	490	520	550

## CONSIDERACIONES FINALES

Las curvas de endurecimiento del hormigón, son función del tipo de cemento y de la razón agua-cemento.

Las ganancias de resistencia, o incremento entre dos edades, son función del tipo de cemento y de la razón agua-cemento. Las resistencias relativas de edades tempranas con respecto a la de 28 días, son menores cuanto mayor es la razón agua-cemento.

Por estas razones, la predicción de resistencia a una edad, con los resultados de resistencias a edades más tempranas, no es fácil, aun para un mismo tipo de cemento.

Con los resultados de esta experiencia se ha logrado el mejor ajuste de la relación resistencia a compresión-edad del hormigón, hasta edades de 28 días, con la expresión de una curva de tipo logarítmica de la forma:  $R = k_1 + k_2 \cdot \log T$  en que:  $R$ , resistencia a compresión,  $\text{kgf/cm}^2$ ;  $T$ , edad, días;  $k_1$  y  $k_2$ , coeficientes que dependen del tipo de cemento y de la razón agua-cemento.

Las resistencias probables, que se resumen en la Tabla IV, son las posibles de obtener en faenas en que se confeccione hormigón con los cementos utilizados, y en las razones agua-cemento empleadas en este trabajo (o interpolación de ellas). Es necesario destacar que se ha trabajado con componentes de buena calidad, dosificaciones en peso, confección cuidadosa, tratamiento y curado normal, y control estricto de todas las operaciones; todos requisitos esenciales para obtener un buen hormigón.

## BIBLIOGRAFIA

1. NCh.163.Of.77. INN. *Aridos para morteros y hormigones — requisitos generales.*
2. ACI-214-77. American Concrete Institute. *Recommended practice for evaluation of compression test results of field concrete.*
3. HALD, A. *Statistical theory with engineering applications.* John Wiley, London, 1952.
4. FISHER, R.A. y YATES, F. *Tablas estadísticas para investigadores científicos,* Aguilar, Madrid, 1954.
5. VENUAT, M. Elementos de estadística, IDIEM, *Informe Técnico n° 6,* 1963, traducción por M. Piñeiro.
6. HUMMEL, A. *Prontuario del hormigón,* ETA, 1966.
7. PIÑEIRO, M. Relaciones entre las resistencias a compresión de hormigones a 7 y 28 días. *Revista del IDIEM,* vol. 2, n° 1, abril 1963.

## EARLY COMPRESSIVE STRENGTH DEVELOPMENT OF HIGH STRENGTH CONCRETE

### SUMMARY:

*The compressive strengths at 1, 2, 3, 4 and 28 days of concretes, suitable for prestressed concrete, made of three types of cement and three water cement ratios were determined in laboratory tests. The results are presented as graphs and correlations between strengths at different ages.*