

DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGON - METODO DEL FACTOR RETENIDO Y LA GRADUACION GEOMETRICA: UN ESTUDIO TEORICO Y EXPERIMENTAL

R. D. Cabrera Jara¹, A. Acosta Cazal¹, A. Medina Acosta²

Laboratorio de Materiales de Construcción/Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Asunción – Campus Universitario – San Lorenzo / Paraguay – Teléfono / Fax: 595 21 585581/4

E-mail: ridacab@yahoo.com.ar , augustoacostac@yahoo.com.ar

Palabras claves: Factor retenido, graduación geométrica, composición granulométrica

RESUMEN

En este trabajo se trata en forma teórica y experimental un nuevo método para el diseño de mezclas, el cual es denominado “Método del Factor Retenido” y se compara con los resultados obtenidos por el método recomendado por la ACI 211.1 para hormigones usuales. Para proporcionar los agregados se utilizó como base una curva continua denominada “Graduación Geométrica”. Esta “Graduación Geométrica” fue modificada para obtener un mejor empaquetamiento de partículas y para que pueda ser utilizada para todos los Tamaños Máximos de los Agregados (TMA). Se compararon las resistencias entre ambos métodos para tres relaciones agua/cemento, la misma cantidad de agua y un mismo TMA, observándose la influencia que tiene la composición granulométrica del agregado en dos propiedades del hormigón. De los resultados obtenidos se puede observar una decidida influencia de la composición granulométrica de los agregados en la resistencia a la compresión y en la trabajabilidad del hormigón usual.

¹ Ingeniero Civil, Miembro del Laboratorio de Materiales de Construcción

² Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil

INTRODUCCION

La selección de los materiales componentes del hormigón es el primer paso en la búsqueda de hormigones con ciertas y deseadas características de desempeño. El paso siguiente es el proceso denominado diseño de mezclas del hormigón a través del cual es obtenida la proporción ideal de esos componentes [1]. Antes de realizar alguna mezcla, se deben conocer los materiales que serán utilizados. Una vez obtenidas sus características físicas y químicas se podrán considerar varios caminos:

- El primero de ellos es, variando la combinación, mantener constante el porcentaje de agregado fino en el total. Este caso no puede ser considerado, pues, para mezclas ricas en aglomerante, habría un gran aumento de argamasa y en mezclas pobres una disminución.
- El segundo camino mantiene constante la cantidad de agregado grueso, de manera a mantener el índice de vacíos, siendo necesario la misma cantidad de argamasa para llenar esos vacíos.
- El tercer camino mantiene constante la composición granulométrica total.

Cualquiera de los dos últimos caminos nos lleva a hormigones bien proporcionados [2]. Actualmente, lo requerido para un hormigón moderno es la mejor comprensión de los componentes y como ellos se combinan e interaccionan para producir propiedades diferentes, así como, para mejorar el diseño y conseguir más eficiencia en el uso de los materiales. La textura superficial, la forma y la composición granulométrica tienen una profunda influencia sobre las propiedades plásticas del hormigón, influenciando principalmente en la demanda de agua. Sin embargo, es imaginable que ellos también tengan un efecto directo sobre la resistencia [3]. Estudios realizados sobre la optimización de mezclas binarias de agregados para la producción de hormigón concluyeron que, la mayor masa unitaria puede no ser un buen indicador sobre el desempeño de la fracción agregado del hormigón [4]. Uno de los factores que afecta el empaquetamiento de las partículas es la composición granulométrica, pues la secuencia de llenado de los vacíos existentes entre las partículas, con una composición granulométrica adecuada del sistema, determina el aumento o no de la densidad del mismo [5].

Con el método propuesto se trata de obtener el mejor empaquetamiento de agregados utilizando, por ejemplo, el método de las Graduaciones Geométricas y compararlo con el método de dosificación utilizado por American Concrete Institute (ACI), para hormigones usuales, en lo referente a la resistencia a la compresión y a la trabajabilidad. En Paraguay, normalmente los agregados gruesos más utilizados son las piedras trituradas y como agregados finos se utilizan una mezcla de piedra triturada y arena lavada de río. En este trabajo se utilizó el método de las Graduaciones Geométricas para el empaquetamiento de agregados, lo cual no significa que no se pueda utilizar cualquier otro método de empaquetamiento.

Graduación Geométrica

Se llama Graduación Geométrica (gg) a una curva granulométrica continua, en que los porcentajes de tamaños sucesivos de la serie normal de tamices (serie de Tyler), mantienen una relación geométrica entre sí. Por tanto, la graduación geométrica es una progresión geométrica, cuya razón es la graduación dividida por 100, y cuya suma de retenidos es igual a 100%. De esta forma se puede establecer el porcentaje retenido en el primer tamiz inmediatamente inferior al del TMA de la combinación y consecuentemente, las demás de la serie de tamices a través de la expresión:

$$\beta = 100 \frac{(1 - \alpha)}{(1 - \alpha^n)} \quad (1)$$

Donde,

β = porcentaje retenido en tamiz inmediatamente inferior al TMA de la serie normal

α = gg (graduación geométrica en %) dividida por 100

n = número de tamices de la serie normal

Esto fue propuesto inicialmente por el consultor Roy Carlson para estudios preliminares de diseño de mezclas para la Represa de Itaipú [6]. En este trabajo se realizó una modificación en el modo de considerar el valor " β ", pues ese valor se toma para el tamiz N° 200 (0,075 mm) dando la misma fórmula enunciada más arriba y utilizando el criterio del modelo de Andreassen y Andersen en su estudio sobre el empaquetamiento de partículas [7]. También se debe considerar el valor de la razón de la progresión geométrica como $1/\alpha$, donde α es función de la graduación geométrica con el mismo significado anterior. La Tabla 1 nos

muestra la secuencia de valores retenidos en los tamices considerados para diferentes tamaños máximos de los agregados siempre considerados en volumen absoluto. Los tamices de 12,7 y 25,4 mm no pertenecen a la serie normal y son denominados tamices intermedios.

Tabla 1: Distribución de retenidos para diferentes tamaños máximos

TMA	Tamices												
	0,075	0,15	0,30	0,60	1,20	2,40	4,80	9,60	12,70	19,10	25,40	38,10	
38,10	β	β/α	β/α^2	β/α^3	β/α^4	β/α^5	β/α^6	β/α^6	$1/3(\beta/\alpha^3)$	$2/3(\beta/\alpha^3)$	$1/3(\beta/\alpha^3)$	$2/3(\beta/\alpha^3)$	0
25,40	β	β/α	β/α^2	β/α^3	β/α^4	β/α^5	β/α^6	β/α^6	$1/5(\beta/\alpha^3)(1+\alpha)$	$2/5(\beta/\alpha^3)(1+\alpha)$	$2/5(\beta/\alpha^3)(1+\alpha)$	0	0
19,10	β	β/α	β/α^2	β/α^3	β/α^4	β/α^5	β/α^6	β/α^6	$1/3(\beta/\alpha^3)$	$2/3(\beta/\alpha^3)$	0	0	0
12,70	β	β/α	β/α^2	β/α^3	β/α^4	β/α^5	β/α^6	$3/5(\beta/\alpha^3)(1+\alpha)$	$2/5(\beta/\alpha^3)(1+\alpha)$	0	0	0	0
9,60	β	β/α	β/α^2	β/α^3	β/α^4	β/α^5	β/α^6	0	0	0	0	0	0
4,80	β	β/α	β/α^2	β/α^3	β/α^4	β/α^5	β/α^6	0	0	0	0	0	0

Factor Retenido del Agregado

Se define como factor retenido del agregado al área comprendida entre la curva formada por los valores retenidos parciales en cada tamiz considerado, el eje de abscisas en escala logarítmica y el eje de ordenadas que pasa por el punto correspondiente al tamiz N° 100. Matemáticamente esta definición se puede representar en forma simplificada para cualquier tamaño máximo del agregado como:

$$f_r = RA_{100} - \frac{1}{2} RA_{9,6} + \frac{1}{2} \left(\frac{R_{9,6}}{3} - R_{100} \right) \quad (2)$$

Donde,

RA_{100} = retenido acumulado en el tamiz N° 100 (0,15 mm), en volumen absoluto

$RA_{9,6}$ = retenido acumulado en el tamiz de 9,6 mm, en volumen absoluto

$R_{9,6}$ = retenido en el tamiz de 9,6 mm, en volumen absoluto

R_{100} = retenido en el tamiz N° 100 (0,15 mm), en volumen absoluto

Método del Factor Retenido

El método del factor retenido (MFR) consiste simplemente en la resolución de un sistema de ecuaciones, las cuales dependen de la cantidad de agregados que compondrán la mezcla, considerados siempre en volumen absoluto. La primera ecuación (3) es la que iguala el factor retenido de cada agregado componente por su correspondiente contribución al factor retenido de la curva granulométrica considerada. La segunda (4) es la que indica que la suma de la contribución de cada agregado es igual a 100%. Una tercera ecuación (5) es la que relaciona el

volumen de agregados que quedan retenidos en el tamiz N° 4 y el pasante por dicho tamiz. Estas son las tres ecuaciones básicas en el Método del Factor Retenido. Cuando tenemos más de tres agregados se utiliza el método de los mínimos cuadrados para encontrar la ecuación faltante. Evidentemente los resultados de las contribuciones de cada agregado componente estarán en función de la relación entre gruesos y finos. La determinación del valor de dicha relación se realizará por tanteo o con ayuda de un ordenador, con lo cual se determinarán los porcentajes de contribución de cada agregado componente. Matemáticamente estos conceptos se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\sum_1^i f_{ri} \times X_i = 100 \times f \quad (3)$$

$$\sum_1^i X_i = 100 \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_1^i n_i \times X_i}{\sum_1^i (1 - n_i) \times X_i} \quad (5)$$

Donde,

f_{ri} = factor retenido de cada agregado componente, en volumen absoluto

f = factor retenido de la curva considerada, en volumen absoluto

X_i = contribución de cada agregado en porcentaje

n_i = porcentaje retenido en el tamiz N° 4 dividido por 100

r = relación entre agregados gruesos y finos, en volumen absoluto

MATERIALES Y METODOS

Materiales

Los agregados utilizados fueron cuatro, de los cuales tres fueron del tipo basáltico y el cuarto fue una arena del río Paraguay. Sus características se encuentran en la Tabla 2. Como aglomerante fue utilizado un cemento CPIIF-32 de la marca Vallemí (Paraguay). La denominación Piedra Triturada 4^{ta}, 5^{ta} y 6^{ta} es la comercial utilizada normalmente en Paraguay y a medida que disminuye su numeración, mayor es su módulo de finura (p.e.: la piedra triturada 4^{ta}

tiene tamaños comprendidos entre 25,4 y 12,7 mm o 25,4 y 9,6 mm).

Tabla 2: Características de los agregados

Tamices (mm)	Análisis Granulométrico			
	Retenidos Parciales (%)			
	Agregados gruesos		Agregados finos	
	Piedra Trit. 4 ^{ta}	Piedra Trit. 5 ^{ta}	Piedra Trit. 6 ^{ta}	Arena Lavada
0,15	0,1	1,0	1,9	37,4
0,30	0,1	1,6	3,9	44,1
0,60	0,0	3,1	11,7	4,3
1,20	0,0	7,9	26,8	0,1
2,40	0,4	22,7	46,2	0,0
4,80	4,3	51,1	7,0	0,0
9,60	5,7	10,3	0,0	0,0
12,70	68,8	0,0	0,0	0,0
19,10	20,6	0,0	0,0	0,0
25,40	0,0	0,0	0,0	0,0
38,10	0,0	0,0	0,0	0,0
Densidad seca(g/cm ³)	2,629	2,520	3,024	2,640
Cap. de Absorción(%)	0,396	0,914	0,200	0,200
Módulo de Finura	7,14	5,38	4,25	1,39
Factor Retenido	53,326	93,829	96,654	67,272
Ret. Acum. en Tamiz N° 4(en %)	99,4	61,5	7,0	0,0

Métodos utilizados

Para determinar la cantidad de agua a utilizar en el hormigón, en el cual fueron utilizados los cuatro agregados de la Tabla 2, se tomó como referencia el valor de la tabla correspondiente a la ACI para un TMA = 25,4 mm, el cual corresponde al TMA de la Piedra Triturada 4^{ta}. Dicha cantidad fue de 193 Kg/m³, para un asentamiento de 90 ± 10 mm. Esa cantidad de agua se mantuvo constante para tres relaciones agua/cemento de 0,45; 0,56 y 0,68 equivalentes según la tabla de la ACI a 40, 30 y 21 MPa respectivamente. Se moldearon 12 probetas de 10 x 20 cm. por relación agua/cemento utilizando el método de la ACI, en donde los agregados cumplen las exigencias granulométricas para agregados gruesos y finos de la ASTM C-33, siendo el módulo de finura del agregado fino combinado de 2,6. Para la utilización del Método del Factor Retenido se tomaron 5 graduaciones geométricas de 67,5%, 70%, 72,5%, 75% y 77,5%, las cuales mostraban distintas combinaciones de agregados desde ásperas a argamasadas respectivamente. La cantidad de agua escogida se mantuvo constante, de manera a observar cómo variaba la trabajabilidad del hormigón con las diferentes graduaciones geométricas. Se moldearon 12 probetas por graduación geométrica para cada relación agua/cemento. En todos los casos, fueron ensayadas a la compresión 6 probetas a los 7 días y 28 días. Con los resultados obtenidos se

trazaron curvas polinomiales sin regresión para cada relación agua/cemento y para cada edad considerada. En todos los casos se realizaron correcciones de humedad de los agregados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

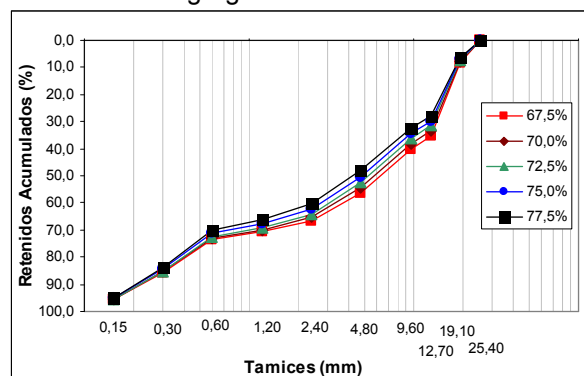
Comportamiento general

En la Tabla 3 se presentan las diferentes curvas de material retenido en volumen absoluto, tanto para la curva ideal de la graduación geométrica como de la combinación de los agregados utilizados. Cabe destacar que dichos agregados son utilizados en su forma comercial. De los valores obtenidos se puede decir que, a medida que la graduación geométrica crece, existe un aumento pequeño en la cantidad de agregados de tamaños menores al tamiz N° 4 y un descenso en la cantidad de agregado grueso. Comparando los valores de la curva ideal y de la combinada se puede decir que existe una diferencia marcada en los tamices menores y mayores en cuanto a la cantidad de material.

Tabla 3: Retenidos parciales de la graduación geométrica ideal y la mezcla de agregados

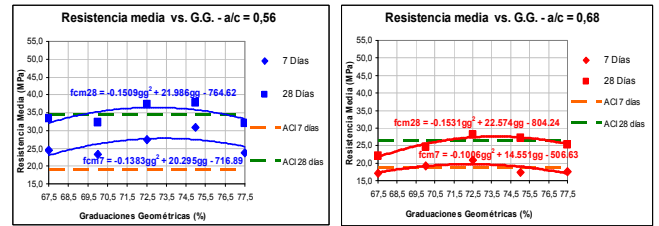
99 (%)	Curva Granulométrica Ideal												
	Tamiz (mm)												
67,5	1,4	2,1	3,2	4,7	6,9	10,3	15,3	11,2	22,4	22,4	0,0	0,0	
70,0	1,8	2,6	3,7	5,3	7,5	10,7	15,3	10,6	21,3	21,3	0,0	0,0	
72,5	2,2	3,1	4,2	5,8	8,0	11,1	15,3	10,0	20,1	20,1	0,0	0,0	
75,0	2,7	3,6	4,8	6,4	8,6	11,4	15,2	9,5	18,9	18,9	0,0	0,0	
77,5	3,3	4,2	5,4	7,0	9,0	11,6	15,0	8,9	17,8	17,8	0,0	0,0	
99 (%)	Curva Granulométrica Combinada												
	Tamiz (mm)												
67,5		10,0	12,0	2,9	4,3	10,0	16,2	5,1	27,1	8,1	0,0	0,0	
70,0		10,1	12,2	3,1	4,8	10,8	16,2	4,9	25,7	7,7	0,0	0,0	
72,5		10,4	12,6	3,3	5,2	11,5	16,1	4,8	24,3	7,3	0,0	0,0	
75,0		10,8	13,1	3,5	5,5	12,0	15,9	4,6	22,9	6,9	0,0	0,0	
77,5		11,4	13,7	3,7	5,8	12,5	15,6	4,4	21,5	6,4	0,0	0,0	

Fig. 1: Gráfico de retenidos acumulados de la mezcla de agregados en volumen absoluto



Trabajabilidad y resistencia a la compresión

En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos en todos los ensayos para dos edades en el caso de la resistencia a la compresión. De la Tabla 4 y de la Fig. 2 se puede observar que a medida que aumenta la graduación geométrica, la trabajabilidad va descendiendo y que también existe un descenso de la trabajabilidad a medida que la relación agua/cemento desciende. En el caso de la relación $a/c = 0,45$ se vuelve más acentuada comparándola con el diseño de mezclas de ACI. Por tanto, podemos decir que en el rango de hormigones con relaciones a/c más bajas existe un descenso en la trabajabilidad para una misma cantidad de agua de amasado y que, para un aumento de la cantidad de agregados gruesos en una combinación, la trabajabilidad también aumenta. En cuanto a la resistencia a compresión, los resultados mostraron a medida que la graduación geométrica crecía, la resistencia a la compresión también, pero hasta un cierto punto en el cual volvía a descender. Este fenómeno se observó tanto a los 7 días como a los 28 días, siendo más pronunciada la curvatura a los 28 días. Trazando la curva de tendencia por los puntos obtenidos se determina un valor máximo de la resistencia a la compresión para una graduación geométrica determinada para cualquier relación a/c . Comparando las curvas obtenidas puede decir que con una alta relación a/c , por ejemplo, $a/c = 0,68$ los resultados obtenidos por el Método del Factor Retenido y el Método de la ACI, están muy próximos. Pero a medida que la relación a/c desciende la diferencia se va haciendo más acentuada.



	a/c 0,45		0,56		0,68	
	MFR	ACI	MFR	ACI	MFR	ACI
Relación Resistencia Media/Peso del cemento (MPa/Kg)	0,114	0,101	0,105	0,100	0,098	0,092
Diferencia (MPa/Kg)	0,013		0,006		0,006	

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un nuevo modelo de diseño de mezclas de hormigón basado en un nuevo concepto “factor retenido de los agregados” y se comparó con el diseño de mezclas de hormigón usual propuesto por ACI. Como conclusiones se puede decir que:

- Para las tres relaciones a/c , la resistencia a la compresión máxima extraída de las curvas de tendencia fue mayor que las resistencias a la compresión correspondientes al método de la ACI.
- La trabajabilidad se ve afectada por la relación a/c y la composición granulométrica.
- Cuando la relación a/c disminuye, la diferencia entre las relaciones Resistencia Media/Peso del cemento se acentúa entre ambos métodos, lo cual está indicando una mayor influencia en la manera de diseñar una mezcla, con relación a la composición de los agregados.

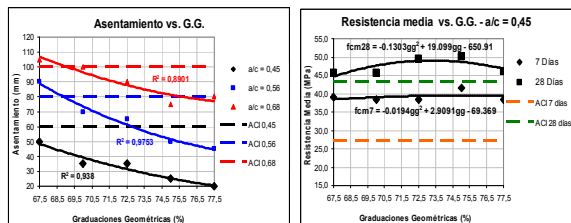
REFERENCIAS

- Mehta, P.K. y Monteiro, P.J.M. (1994), “Concrete: Estructura, Propiedades e Materiais”, Editora PINI, San Pablo, 573 p.
- Petrucchi, E.G.R. (1981), “Concrete de Cimento Portland”, 8ª Ed., Editora O Globo, Porto Alegre-Río de Janeiro, 307 p.
- Skalny, J. y Mindess, S. (1998), “Materials Science of Concrete V”, The American Ceramic Society, Ohio, Cap. 3, 578 p.
- Carneiro, A.M.P., Barata, M.S., Lima, J.M. y Quaresma, G.L. (2002), “Otimização de misturas binarias de agregados para produção de concreto”, IBRACON, 44º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais.
- Gogola, G.W. (2004), “Influencia das propriedades dos agregados no

Tabla 4: Resultados obtenidos por ambos métodos

RESISTENCIA MEDIA A LA COMPRESION (MPa)																				
gg%	67,5		70,0		72,5		75,0		77,5		Maximo		ACI							
	Asent (mm)	Edad (días)	Asent (mm)	Edad (días)	Asent (mm)	Edad (días)	Asent (mm)	Edad (días)	Asent (mm)	Edad (días)	Edad (días)	Asent (mm)	Edad (días)	Asent (mm)	Edad (días)					
0,45	50	39,0	45,6	35	38,4	45,7	35	38,3	49,4	25	41,7	50,1	20	38,5	46,0	39,7	49,0	60	27,1	43,3
0,56	90	24,5	33,5	70	23,3	32,2	65	27,3	37,2	50	30,8	37,8	45	23,8	32,1	27,7	36,2	80	18,8	34,3
0,68	105	17,1	22,0	100	19,2	24,7	90	20,8	28,2	75	17,4	27,1	80	17,6	25,4	19,5	27,9	100	18,4	26,2

Fig. 2: Comparación gráfica entre el Método Factor Retenido y el Método de la ACI



desempenho de concretos de cimento Portland”, IBRACON, 46º Congresso Brasileiro do Concreto, Anais.

- [6] Scanduzzi, L. y Rodrigues Andriolo, F. (1986), “Concreto e seus Materiais”, Editora PINI, San Pablo, 553 p.
- [7] Mesquita, L.P., Willrich, F.L. y Lima Junior, H.C. (2005), “The Use of Mathematical Particle Packing Models on the casting of High Strength Micro-Concrete”, Proceeding of the FIB Symposium, Vol. 2, La Plata, Argentina.