

Study of the concrete's compressive strength due to the combined effect of the water-cement ratio, the coarse-fine aggregate ratio and the source of the aggregates

Rómel Solís-Carcaño, Eric I. Moreno y Carlos Arcudia-Abad

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán.

Av. Industrias No Contaminantes por Anillo Periférico Norte s/n. Apartado Postal 150

Cordemex, CP 97110. Mérida, Yucatán, México. Tel: +52 (999) 941-0093.

Fax: +52 (999) 941-0189. tulich@tunku.uady.mx, emoreno@tunku.uady.mx,

aabad@tunku.uady.mx

Abstract

Concrete's compressive strength is the main parameter used to control the quality of this material. From the beginning, when concrete was started to be used as structural material, it was found that the correlation between the water and the cement employed in the mixture had a great influence in the strength of concrete. Later on, other studies showed that the optimum combination between the fine and the coarse aggregate, seeking the highest compactness in the mixture, was also a factor that affects the concrete quality. This work presents a study about the concrete's compressive strength using three variables: the correlation between water and cement (w/c), the correlation between coarse and fine aggregates (c/f), and the aggregate's quarries. By means of a factorial design, the study used values of w/c and of c/f , in a possible range actually employed to make concrete, and several types of crushed limestone aggregates from the Yucatan Peninsula, which may not present the usual properties. It was found a significant influence of the w/c and the quarry in the compressive strength of concrete.

Key words: Compressive strength, concrete, crushed limestone aggregates, variance factorial analysis.

Estudio de la resistencia del concreto por el efecto combinado de la relación agua-cemento, la relación grava-arena y el origen de los agregados

Resumen

La resistencia a la compresión del concreto es el principal parámetro utilizado para medir la calidad de este material. Desde los primeros años en los que el concreto se empezó a utilizar como material estructural se encontró que la relación entre el agua y el cemento, utilizados en la mezcla, tiene una gran influencia en la resistencia del concreto. Posteriormente, otros estudios mostraron que la combinación óptima entre los agregados gruesos y finos, buscando la mayor compactación entre éstos, también era un factor que afecta a la calidad del concreto. Este trabajo presenta un estudio de la resistencia del concreto manipulando tres variables: la relación entre el agua y el cemento (a/c), la relación entre la grava y la arena (g/a) y el banco de origen de los agregados. Se utilizaron valores de a/c y de g/a en un rango posible para la fabricación del concreto y varios tipos de agregados calizos triturados de la Península de Yucatán, mismos que podrían presentar características no usuales, en un diseño factorial. Se encontró influencia significativa de a/c y el banco de origen de los agregados en la resistencia del concreto.

Palabras clave: Agregados calizos triturados, análisis factorial de varianza, concreto, resistencia.

Introducción

La resistencia de un material se puede definir como su habilidad para resistir esfuerzos sin fallar [1]; entendiéndose lo anterior, para el caso del concreto, como el nivel de esfuerzo requerido para causar la fractura, lo que hace incapaz al material para soportar una carga mayor.

La resistencia a la compresión ha sido la propiedad más valorada en el concreto, ya sea porque es el principal indicador de la fortaleza del material o porque es una propiedad que se relaciona con la mayoría de las otras características del concreto, como son su resistencia al esfuerzo cortante, su módulo de elasticidad o su permeabilidad.

De ahí que el índice universal de medición de la calidad del concreto sea su resistencia a la compresión, la cual se obtiene sometiendo a fuerzas uniaxiales probetas de dimensiones estandarizadas, moldeadas a partir de una muestra del material. Además de las propiedades inherentes del material, los principales factores que afectan los resultados de las pruebas a compresión son: el curado inicial, el tamaño de la probeta, la velocidad de aplicación de la carga, la esbeltez de la probeta, el estado de humedad y el cabeceo o refrentado [2].

El concreto es un material heterogéneo constituido por dos partes o componentes: un grupo de partículas de roca de diferentes tamaños y una pasta de cemento hidratado. Además de estos dos componentes se considera que este material tiene un tercer elemento constitutivo que son las interfases entre las partículas de agregado y la pasta de cemento, que influyen tanto en la resistencia como en la rigidez del concreto.

Generalmente, existe una relación inversa entre la porosidad y la resistencia de los materiales. Dado que el concreto es un material formado por dos componentes, la porosidad de cada uno puede convertirse en el límite de su resistencia; así, la resistencia del concreto podría pensarse como dependiente de las características y las proporciones de sus componentes.

Desde 1918, Duff Abrams encontró que existe una regla que relaciona la resistencia del concreto con la proporción entre las cantidades de agua y de cemento (a/c) [3]. Lo anterior se funda-

menta en que este parámetro es responsable, en gran medida, de la cantidad de productos de hidratación del cemento y por tanto, de la porosidad de la pasta. Esta regla sólo es válida, desde luego, si se dan las condiciones de curado que favorezcan que los óxidos del cemento se hidraten [4].

Según Neville [5], la resistencia a la compresión depende principalmente de su relación a/c y de su grado de compactación. Esta última característica también se puede asociar a la trabajabilidad de la mezcla, que el reporte del comité ACI 116R [6] define como la propiedad del concreto que determina la facilidad para mezclar, colocar, compactar y acabar el material. De aquí que una mezcla será más fácil de compactar mientras más fluida sea; esto último generalmente significa que tenga la mayor cantidad de agua.

También se ha encontrado que juega un papel importante en la trabajabilidad de la mezcla, el hecho de que los agregados tengan una buena distribución granulométrica, es decir, una adecuada proporción relativa de los diferentes tamaños de las partículas constituyentes de los agregados [7].

La influencia del agregado no ha sido suficientemente considerada en la mayoría de los modelos desarrollados para estimar la resistencia del concreto. Por ejemplo, el reporte del ACI 211 [8] no toma en cuenta este factor en su guía para dosificar el concreto, y relaciona únicamente la a/c con la resistencia media esperada. Esto se basa en que la resistencia del agregado es generalmente mayor a la de la pasta de cemento y a la de la zona de transición de las interfases, por lo que se espera que estas resistencias sean las que gobiernen la falla en el material.

O'Reilly [9] estudió la influencia de la forma y de las cantidades relativas de los agregados, y concluyó que la relación entre la cantidad de grava y arena en la mezcla es un factor determinante en la resistencia del concreto. Además, reportó que al disminuir la cantidad de vacíos entre los agregados se minimiza la cantidad de pasta de cemento, lo que hace que el concreto sea más económico y que tenga un mejor desempeño desde el punto de vista técnico.

En la Península de Yucatán se utilizan agregados para concreto que se obtienen de la trituración de roca caliza formada geológicamente

de sedimentos calcáreos marinos del Cenozoico. Esta caliza está compuesta, fundamentalmente, por carbonato de calcio (77%) y carbonato de magnesio (13%) [10]. Las rocas para la manufactura de los agregados son extraídas, con explosivos, de estratos que se localizan desde el nivel del terreno natural, hasta una profundidad máxima de 10 metros, buscando no rebasar el nivel de aguas freáticas. Las rocas de las diferentes canteras o bancos presentan variaciones en sus propiedades físicas y generalmente se hacen más porosas a medida que se acercan a la zona de saturación del subsuelo [11]. En general, los agregados producto de la trituración de esta roca suelen tener alta absorción y gran cantidad de finos.

El objetivo de este trabajo fue estudiar la resistencia del concreto bajo los efectos de tres factores: la relación agua/cemento, la relación grava/arena y el banco de origen de los agregados provenientes de la Península de Yucatán, considerando que las características peculiares de los agregados de esta región podrían ser diferentes a los agregados comúnmente usados. Se utilizó un diseño factorial, el cual ha sido ampliamente utilizado en otras áreas del conocimiento, tales como la economía, las ciencias de la salud y del comportamiento humano, etc. [12].

Metodología

Para cumplir el objetivo propuesto se utilizó un diseño factorial de tres factores. La variable dependiente fue la resistencia a la compresión uniaxial del concreto (medida en kg/cm^2); y las variables independientes fueron:

- La relación a/c en peso, la cual se manipuló haciéndola variar en cuatro niveles: 0,4, 0,5, 0,6, y 0,7. Estos valores corresponden al rango de resistencia de los concretos estructurales de peso normal ($200 \text{ kg}/\text{cm}^2$ - $400 \text{ kg}/\text{cm}^2$).
- La proporción g/a en volúmenes absolutos, la cual se hizo variar también en cuatro niveles: 0,82, 1,00, 1,22 y 1,50. Estos valores corresponden a un porcentaje de utilización de grava con relación al total de los agregados de: 45, 50, 55 y 60%, respectivamente.
- El banco de origen de los agregados, el cual se hizo variar en 6 modalidades: A, B, C, D,

E y F, correspondientes a agregados provenientes de diferentes canteras de extracción y trituración de roca caliza de la Península de Yucatán.

Los diseños factoriales son útiles ya que permiten evaluar los efectos individuales de cada variable independiente sobre la variable dependiente. Así como los efectos combinados de las variables independientes. De ahí que, en este trabajo se hayan evaluado dos tipos de efectos en la resistencia del concreto: los efectos principales, que son los que producen cada una de las variables independientes, y los efectos de la interacción entre dos o más variables independientes; en este caso, los efectos en la resistencia de las interacciones entre la a/c y la g/a ($a/c * g/a$), la a/c y el banco ($a/c * \text{banco}$), la g/a y el banco ($g/a * \text{banco}$), o bien, el efecto de la interacción entre las tres variables independientes ($a/c * g/a * \text{banco}$). La ecuación 1 presenta el modelo considerado en el análisis factorial:

$$R_{ijk} = \mu + a_i + g_j + b_k + (ag)_{ij} + (ab)_{ik} + (gb)_{jk} + (agb)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

en donde: R es la resistencia, μ es la media global, a, g y b son los efectos de a/c, g/a y banco, respectivamente; ag, ab, gb y agb son los efectos de interacción de segundo y tercer orden; y ε es el error. Para este modelo, los subíndices i y j toman valores de 1 a 4 y el subíndice k toma valores de 1 a 6.

Las hipótesis de los efectos principales resultaron ser:

$$H_0 : a_1 = a_2 = \dots = a_4 = 0$$

$$H_1 : \text{Alguna } a \neq 0$$

$$H_0 : g_1 = g_2 = \dots = g_4 = 0$$

$$H_1 : \text{Alguna } g \neq 0$$

$$H_0 : b_1 = b_2 = \dots = b_6 = 0$$

$$H_1 : \text{Alguna } b \neq 0$$

De la misma forma se plantearon las hipótesis relativas a la influencia de las interacciones de las variables dependientes sobre la resistencia. Se consideró un nivel de significancia mínima de 0,05.

Al combinar todos los niveles de las variables independientes se formaron 96 grupos diferentes o tratamientos. El orden en que se realiza-

ron los tratamientos y todas las observaciones producto de los mismos, fue debido a un procedimiento de selección aleatorio. Para cada tratamiento se utilizaron probetas estándar de forma cilíndrica con dimensiones 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Para la fabricación, curado y prueba de compresión del concreto se siguieron las normas ASTM [13].

Las variables a/c y g/a fueron manipuladas dentro de un amplio rango que incluyen los valo-

res más probables de ser utilizados en la fabricación del concreto en la región y el contexto del estudio. Los 6 bancos de agregados diferentes se eligieron de aquellos que controlan la mayoría del mercado en la región y presentan propiedades físicas relativamente uniformes.

La Tabla 1 muestra los 96 tratamientos que resultaron de combinar los niveles de las variables independientes.

Tabla 1
96 tratamientos aplicados al concreto ($a/c * g/a * banco$)

Banco	Relación a/c			
	0,40	0,50	0,60	0,70
A	0,40*1,50*A	0,50*1,50*A	0,60*1,50*A	0,70*1,50*A
	0,40*1,22*A	0,50*1,22*A	0,60*1,22*A	0,70*1,22*A
	0,40*1,00*A	0,50*1,00*A	0,60*1,00*A	0,70*1,00*A
	0,40*0,82*A	0,50*0,82*A	0,60*0,82*A	0,70*0,82*A
B	0,40*1,50*B	0,50*1,50*B	0,60*1,50*B	0,70*1,50*B
	0,40*1,22*B	0,50*1,22*B	0,60*1,22*B	0,70*1,22*B
	0,40*1,00*B	0,50*1,00*B	0,60*1,00*B	0,70*1,00*B
	0,40*0,82*B	0,50*0,82*B	0,60*0,82*B	0,70*0,82*B
C	0,40*1,50*C	0,50*1,50*C	0,60*1,50*C	0,70*1,50*C
	0,40*1,22*C	0,50*1,22*C	0,60*1,22*C	0,70*1,22*C
	0,40*1,00*C	0,50*1,00*C	0,60*1,00*C	0,70*1,00*C
	0,40*0,82*C	0,50*0,82*C	0,60*0,82*C	0,70*0,82*C
D	0,40*1,50*D	0,50*1,50*D	0,60*1,50*D	0,70*1,50*D
	0,40*1,22*D	0,50*1,22*D	0,60*1,22*D	0,70*1,22*D
	0,40*1,00*D	0,50*1,00*D	0,60*1,00*D	0,70*1,00*D
	0,40*0,82*D	0,50*0,82*D	0,60*0,82*D	0,70*0,82*D
E	0,40*1,50*E	0,50*1,50*E	0,60*1,50*E	0,70*1,50*E
	0,40*1,22*E	0,50*1,22*E	0,60*1,22*E	0,70*1,22*E
	0,40*1,00*E	0,50*1,00*E	0,60*1,00*E	0,70*1,00*E
	0,40*0,82*E	0,50*0,82*E	0,60*0,82*E	0,70*0,82*E
F	0,40*1,50*F	0,50*1,50*F	0,60*1,50*F	0,70*1,50*F
	0,40*1,22*F	0,50*1,22*F	0,60*1,22*F	0,70*1,22*F
	0,40*1,00*F	0,50*1,00*F	0,60*1,00*F	0,70*1,00*F
	0,40*0,82*F	0,50*0,82*F	0,60*0,82*F	0,70*0,82*F

Los factores que se controlaron en el experimento y se hicieron permanecer constantes fueron:

1. El procedimiento de compactación (varillado).
2. La edad en que las probetas fueron probadas a la compresión (28 días).
3. El procedimiento de curado de las probetas (curado estándar por inmersión).
4. El tipo de cemento (CPC 30 de marca mexicana, equivalente al ASTM Tipo I).
5. La utilización de los mismos equipos (para pesar, mezclar, cabecear y probar a la compresión).
6. La utilización del mismo personal técnico de laboratorio.

La Tabla 2 muestra la caracterización de las 6 muestras de agregados utilizados; y la Tabla 3 presenta las cantidades de agua efectiva de mezclado utilizadas para cada banco.

Para llevar a cabo el análisis estadístico de los datos experimentales se utilizaron los paquetes estadísticos JMP 6.0 y SPSS 10.0.

Resultados

La Tabla 4 presenta la resistencia media del concreto correspondiente a cada tratamiento.

Tabla 2
Caracterización de los agregados

Banco	A	B	C	D	E	F
Grava						
PVSC, kg/m ³	1 267	1 294	1 288	1 334	1 259	1 219
Densidad, SSS	2,34	2,40	2,35	2,42	2,36	2,34
Absorción, %	5,6	5,5	5,8	5,1	5,7	6,7
Desgaste, %	28	28	25	23	27	27
Arena						
PVSS, kg/m ³	1 340	1 299	1 364	1 379	1 336	1 358
Densidad, SSS	2,51	2,44	2,45	2,54	2,5	2,25
Absorción, %	5,3	4,7	5,0	4,9	3,5	4,7
Finos, %	20	25	14	14	19	22

Tabla 3
Agua efectiva de mezclado por banco

Banco	Agua (kg/m ³)
A	225
B	240
C	215
D	225
E	215
F	250

Resistencia según la a/c

Se clasificaron los concretos según la a/c y se calcularon las medias y las desviaciones estándar de la resistencia para cada nivel. En la Tabla 5 se presentan estos resultados. La Figura 1 muestra gráficamente los valores de las medias de la resistencia, incluyendo sus intervalos de confianza del 95%; en ella se aprecia una clara diferencia entre las medias según la a/c del concreto.

Resistencia según la g/a

Igual que en el caso anterior, se clasificaron los concretos de acuerdo a la g/a y se calcularon las medias y las desviaciones estándar de la resistencia para cada nivel (ver Tabla 5). La Figu-

Tabla 4
Resistencia media (kg/cm^2) por cada tratamiento.

	Relación a/c															
	0,40				0,50				0,60							
	Relación g/a			Relación g/a	Relación g/a			Relación g/a	Relación g/a			Relación g/a				
Banco	1,50	1,22	1,00	0,82	1,50	1,22	1,00	0,82	1,50	1,22	1,00	0,82	1,50	1,22	1,00	0,82
A	334	335	334	338	295	298	298	284	255	261	281	265	237	237	240	242
B	323	329	341	335	306	309	318	314	275	275	244	275	246	235	236	271
C	283	306	304	317	279	263	277	275	229	242	242	246	221	208	223	214
D	372	360	331	337	312	302	347	322	268	276	255	240	238	238	252	237
E	310	328	347	334	305	311	294	317	260	266	237	239	234	235	227	222
F	369	376	342	353	313	307	339	331	285	291	285	296	234	245	256	255
Media	332	339	333	336	302	298	312	307	262	269	257	260	235	233	239	240

Tabla 5
Media y desviación estándar
de la resistencia (kg/cm²)

	Media	Desviación estándar
Relación a/c		
0,40	335	22
0,50	305	20
0,60	262	20
0,70	237	14
Relación g/a		
0,82	286	43
1,00	285	43
1,22	285	43
1,50	283	43
Banco		
A	283	37
B	290	37
C	258	35
D	293	49
E	279	43
F	305	44

ra 2 muestra gráficamente los valores de las medias de las resistencias, incluyendo sus intervalos de confianza del 95%; en ella se aprecia que no hubo diferencia entre las medias según la g/a del concreto.

Resistencia según el banco

De la misma forma, se clasificaron los concretos según el banco y se calcularon las medias y las desviaciones estándar de la resistencia para cada modalidad (ver Tabla 5). La Figura 3 muestra gráficamente los valores de las medias de las resistencias, incluyendo sus intervalos de confianza del 95%; en ella se aprecia algunas diferencias entre las medias que pudieran ser significativas.

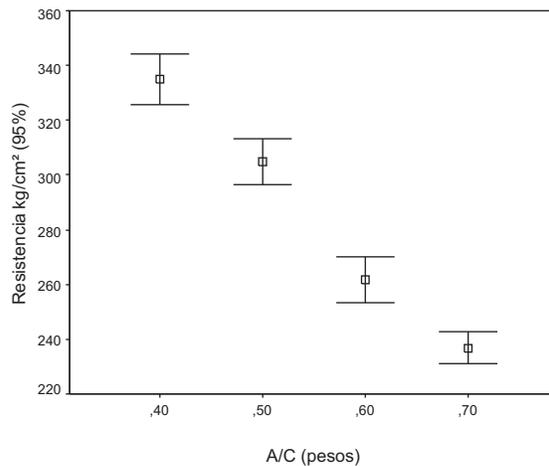


Figura 1. Resistencia media según la a/c.

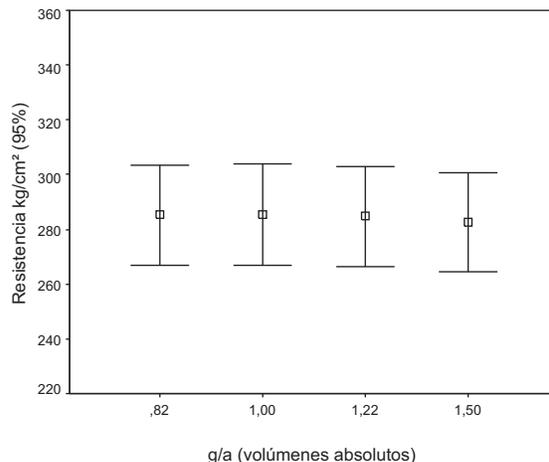


Figura 2. Resistencia media según la g/a.

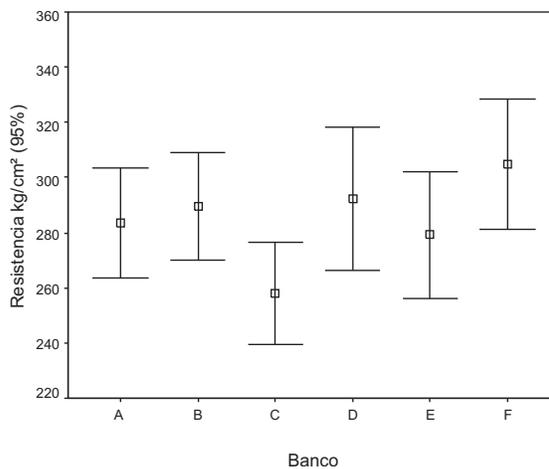


Figura 3. Resistencia media según el banco.

Análisis de varianza

En la Tabla 6 se presenta el resultado del análisis de varianza (ANOVA) realizado con el paquete estadístico JMP. En ella se observa que, en promedio, la resistencia del concreto difiere para los distintos valores de a/c y distingos bancos de origen de los agregados, y por lo tanto estos factores afectan la resistencia del concreto. También puede observarse que no existe evidencia de interacción para a/c*g/a, g/a*banco y para a/c*g/a*banco; únicamente para el efecto a/c*banco se encontró diferencia marginal a nivel de 0,08. De acuerdo con el análisis anterior, la variable g/a no mostró tener efecto alguno en la

resistencia, tanto de manera individual o principal, como de manera interactiva con las otras variables.

La Figura 4 presenta la gráfica de la resistencia promedio contra el banco de agregados para la relación a/c. La gráfica muestra como la mayor resistencia se obtiene en la a/c igual a 0,40 y de los valores de esta a/c, el mayor se observa en el banco F.

La Figura 5 presenta la gráfica de la resistencia promedio contra la a/c con relación al banco de agregados. En este caso, el cruce entre algunas rectas indica el efecto de la interacción a/c*banco.

Tabla 6
Análisis de varianza

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	F	Significancia
Efectos Principales				
a/c	3	136822,53	857,5767	<,0001
g/a	3	103,17	0,6466	0,4240
banco	5	19628,08	24,6050	<,0001
Efectos de interacción				
a/c * g/a	9	1,39	0,0087	0,9259
a/c * banco	15	1639,84	2,0556	0,0810
g/a * banco	15	889,84	1,1155	0,3599
a/c * g/a * banco	45	1481,82	1,8576	0,1125

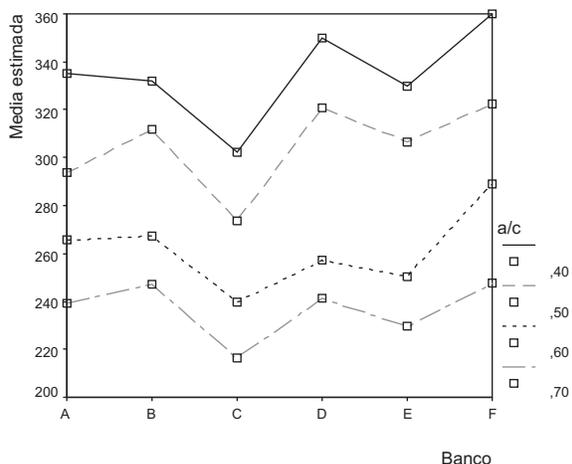


Figura 4. Resistencia media (kg/cm²) respecto a la a/c.

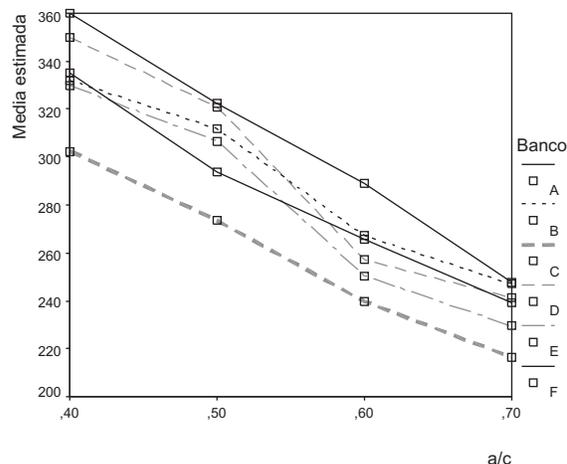


Figura 5. Resistencia media (kg/cm²) respecto al banco.

En la Tabla 7 se muestran los resultados de la prueba *post hoc* de Scheffé para la resistencia respecto a la a/c, obtenidos con el paquete estadístico SPSS. Según la prueba de Scheffé, las medias de las resistencias fueron diferentes para todas las a/c (con un nivel de significancia menor a 0,001).

Por otra parte, en la Tabla 8 se muestran los resultados de la prueba de Scheffé para la resistencia respecto al banco. Según esta prueba, las medias de las resistencias de algunos bancos resultaron significativamente diferentes (con un nivel de significancia menor a 0,05) a las medias de otros bancos: las medias de A, B y E resultaron diferentes a las de C y F; las medias de C resultaron diferentes a todas las demás; la media de D resultó diferente sólo a la de C; y la media de F resultó diferente a las de A, B, C y E.

Discusión

Se verificó la teoría de Duff Abrams en el sentido de que el factor que tiene, en forma individual, la mayor influencia en la resistencia es la a/c [3].

Por otra parte, en el estudio no se pudo confirmar la importancia que tiene en la resistencia el hecho de utilizar la óptima combinación de grava y arena en la búsqueda de la menor canti-

dad de vacíos entre los agregados, como reportó O'Reilly [9]. Probablemente esto se pueda atribuir a que los agregados calizos utilizados, típicos de la Península de Yucatán, sean muy porosos y absorbentes [14]; el rango de porcentaje de absorción de las gravas utilizadas estuvo entre 5,1 y 6,7, mientras que el de las arenas estuvo entre 3,5 y 5,3. De ahí que la resistencia del concreto esté probablemente gobernada, en los concretos estudiados, principalmente por la calidad de la pasta de cemento, más que por la cantidad de pasta; siendo esta última la que se ve influenciada por la compacidad de los agregados.

El factor determinado por el banco de origen de los agregados ocasionó diferencias significativas entre las resistencias de los concretos. Lo anterior pudiera tener dos tipos de causas: unas inherentes a las diferencias en las propiedades físicas de los agregados, y otras atribuibles a las diferencias en las cantidades de cemento utilizado.

Las diferentes cantidades de cemento utilizadas para cada banco fueron definidas por los requerimientos de agua de mezclado necesaria, atendiendo principalmente a la cantidad de finos de la arena. Por ejemplo, la media de los concretos preparados con agregados del banco C, de acuerdo a la prueba de Scheffé fue significativamente diferente de las medias de los concretos de

Tabla 7
Prueba de Scheffé para la resistencia respecto a la a/c

a/c	a/c	Diferencia de la media	Significancia
0,40	0,50	30,0833	<0,001
	0,60	73,3750	<0,001
	0,70	98,1250	<0,001
0,50	0,40	-30,0833	<0,001
	0,60	43,2917	<0,001
	0,70	68,0417	<0,001
0,60	0,40	-73,3750	<0,001
	0,50	-43,2917	<0,001
	0,70	24,7500	<0,001
0,70	0,40	-98,1250	<0,001
	0,50	-68,0417	<0,001
	0,60	-24,7500	<0,001

Tabla 8
Prueba de Scheffé para la resistencia respecto al banco

Banco	Banco	Diferencia de la media	Significancia
A	B	-6,29	0,843
	C	25,31	<0,001
	D	-8,87	0,516
	E	4,25	0,963
	F	-21,43	<0,001
B	A	6,12	0,843
	C	31,43	<0,001
	D	-2,75	0,995
	E	10,37	0,334
	F	-15,31	0,036
C	A	-25,31	<0,001
	B	-31,43	<0,001
	D	-34,18	<0,001
	E	-21,06	<0,001
	F	-46,75	<0,001
D	A	8,87	0,516
	B	2,75	0,995
	C	34,18	<0,001
	E	13,12	0,111
	F	-12,56	0,143
E	A	-4,25	0,963
	B	-10,37	0,334
	C	21,06	<0,001
	D	-13,12	0,111
	F	-25,68	<0,001
F	A	21,43	<0,001
	B	15,31	0,036
	C	46,75	<0,001
	D	12,56	0,143
	E	25,68	<0,001

los demás bancos; para este agregado se requirió la menor cantidad de agua neta de mezclado (215 kg/m^3), y de ahí que las mezclas del banco C contuvieran menos cemento que todas las que tuvieron la misma a/c; este agregado fue el que tuvo el menor porcentaje de finos en la arena (14%). En contraparte, la media de los concretos preparados con el banco F fue significativamente diferente a las medias de 4 de los otros 5 bancos (A, B, C y E); para este agregado se requirió la mayor cantidad de agua neta de mezclado (250 kg/m^3) y la mayor cantidad de cemento para cada a/c; este agregado tuvo el mayor porcentaje de finos en la arena (22%).

Un control de calidad más estricto en la producción de los agregados debe producir porcentajes de finos menores y dentro de los límites aceptables y con esto, cantidades necesarias de agua de mezclado más o menos similares para todos los bancos. Dado lo anterior se podría esperar que el factor representado por el banco dejara de producir diferencias significativas en la resistencia.

Conclusiones

El análisis factorial de varianza de la resistencia del concreto demostró ser una alternativa ventajosa para el estudio de los materiales, ya que analiza los efectos independiente e interactivo que ejercen las variables independientes, en este caso a/c, g/a y el banco.

Dentro del contexto del experimento, utilizando agregados de alta absorción, típicos de la Península de Yucatán, se pudo observar:

- Un efecto en alto grado del factor representado por la relación a/c.
- Un efecto significativo del factor banco.
- Un efecto cercano al nivel significativo de la interacción entre la a/c y el banco
- Un efecto nulo del factor representado por la relación g/a.

Agradecimientos

Los autores reconocen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el financiamiento otorgado para la realización del presente trabajo (Proyecto 34428-U); y agradecen al personal del Laboratorio de Estructuras y Materiales de la Fa-

cultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán su colaboración en la ejecución de las pruebas: F. Duarte, W. Castillo, A. Nadal, y L. Castro. Las opiniones expresadas en este documento son de los autores y no necesariamente de las instituciones participantes.

Referencias Bibliográficas

1. Mehta K. y Monteiro P.: "Concreto: Estructura, Propiedades y Materiales", 1ª edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, D.F., 1998.
2. Delibes A.: "Tecnología y Propiedades Mecánicas del Hormigón", 2ª edición. Instituto Técnico de Materiales y Construcciones, Madrid, 1993.
3. Abrams D.: "Design of Concrete Mixtures", Lewis Institute, Structural Materials Research Laboratory, Bulletin No. 1, 1918.
4. Solís R. y Moreno E.: "Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido húmedo". Ingeniería - Rev. Acad. Fac. Ing. Univ. Aut. Yucatán, Vol. 9, No. 3 (2005) 5.
5. Neville A.: "Tecnología del Concreto", 1ª edición. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., México, D.F., 1999.
6. ACI 116R: "Cemento y Concreto: Terminología". American Concrete Institute, Detroit, 2000.
7. Popovics S.: "Concrete Materials: Properties, Specifications and Testing" 2ª edición. Noyes Publications, New Jersey, U.S.A., 1992.
8. ACI 211: "Proporcionamiento de Mezclas: Concreto Normal, Pesado y Masivo". American Concrete Institute, Detroit, 2001.
9. O'Reilly V.: "Métodos para Dosificar Mezclas de Hormigón". Tecnocret, La Paz, Bolivia, 1997.
10. Pacheco J. y Alonzo L.: "Caracterización del material calizo de la Formación Carrillo Puerto en Yucatán". Ingeniería - Rev. Acad. Fac. Ing. Univ. Aut. Yucatán, Vol. 7, No. 1 (2003) 15.
11. Solís R. y Baeza J.: "Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resis-

- tencia a la compresión del concreto". Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, Vol. 26, No. 1 (2003) 45-55.
12. Kerlinger F.: "Investigación del Comportamiento" 4ª edición. Nueva Editorial Interamericana, México, D.F., 2003.
 13. ASTM: "ASTM Book of Standards Volume 04.02: Construction: Concrete and Aggregates". U.S.A., 2001.
 14. Solís R. y Moreno E.: "Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo". Rev. Fac. Ing. Univ. Central Venezuela, Vol. 21, No. 3 (2006) 101.

Recibido el 16 de Junio de 2006

En forma revisada el 05 de Noviembre de 2008