

Diseño de Mezcla de Hormigón Estructural Liviano con Piedra de Esquisto

Luis M. Colón Ortiz, BSCE
Maestría en Ingeniería Civil
Héctor J. Cruzado, PhD
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad Politécnica de Puerto Rico

Resumen — *En años recientes han ocurrido alzas en los costos de materiales de construcción, en especial en el acero. Por tal razón este trabajo se enfoca en crear un tipo de mezcla de hormigón de baja densidad, que pueda ser costo efectivo para construcción de residencias y edificaciones. Este trabajo estudia las principales características físicas y mecánicas del hormigón liviano estructural utilizando como agregado grueso la roca de esquisto en comparación con hormigones de densidad normal. Se realizaron dos diseños de mezclas de hormigón estructural regidos por los códigos ACI. Las mezclas con esquisto obtuvieron mayores resistencias en esfuerzos en compresión y menor densidad que la mezcla control, en la cual se obtuvieron valores cercanos a los esperados. Se pretende demostrar cómo la roca de esquisto puede ser efectivamente usada para producir hormigón liviano.*

Palabras claves — *agregados livianos, hormigón liviano, piedra de esquisto, reducción de cargas muertas.*

INTRODUCCIÓN

El hormigón elaborado con agregados livianos, comúnmente denominado hormigón liviano, es un material de uso poco difundido en Puerto Rico. Sin embargo, existen ventajas que justificarían su empleo estructural. En efecto, un elevado porcentaje de las cargas y sollicitaciones a las que se ven sometidos diferentes elementos estructurales está representado por el peso propio del hormigón. Al utilizar mezclas elaboradas con agregados de baja densidad (arcilla expandida o roca de esquisto) se pueden reducir dichas sollicitaciones con la consiguiente disminución de secciones o aumento de capacidad resistente, menores cuantías de acero,

menores presiones sobre encofrados, etc. En realidad, la mayor parte de las construcciones utilizando hormigón estructural tienen densidades que fluctúan entre los 145 y 150 pcf. En este proyecto se discute como diseñar una mezcla de hormigón estructural liviano sustituyendo completamente el agregado grueso (piedra regular) por agregado grueso liviano (piedra de esquisto o roca de pizarra) para que se obtenga una densidad entre 90 a 115 pcf y una resistencia en compresión superior a los 2,500 psi. De esta forma se podrán abaratar costos de producción en las construcciones de hormigón.

OBJETIVOS

Se intenta diseñar una mezcla de hormigón estructural a base de piedra de esquisto o roca de pizarra como agregado grueso que pueda lograr los siguientes objetivos:

- Obtener resistencias mayores o similares a las que ofrece el hormigón regular
- Reducir los costos en la construcción de estructuras en hormigón, ya que al reducir la carga muerta se reducen el tamaño de las columnas, zapatas y otros elementos de soporte de cargas.

TRASFONDO

Utilizar hormigones livianos de alto rendimiento permite alivianar el peso de las estructuras reduciendo así la dimensión de las columnas, zapatas y otros elementos. Las fuerzas sísmicas que soporta una estructura construida con hormigón liviano serán menores debido a la disminución del peso.

Las cantidades de acero necesarias para reforzar los elementos de hormigón serán menores ya que se

reducen las cargas significativamente. El efecto que puede tener un mal curado es menor en los hormigones livianos de alto rendimiento que en los hormigones regulares, ya que la liberación del agua atrapada dentro de los agregados porosos ayuda a curar internamente el hormigón y a mejorar la hidratación de las partículas cementicias en la zona de transición interfacial [1].

Piedra de Esquisto

Los agregados livianos son utilizados para la producción de hormigones livianos, dado a su baja densidad y aislamiento térmico, además de que tienen propiedades acústicas lo cual hace que las vibraciones sean minimizadas [1].

Los agregados cumplen un papel de gran importancia en el hormigón, y en el caso de los hormigones livianos de alta resistencia y baja densidad hacen que se produzcan hormigones livianos. Actualmente, a nivel internacional existen muchas industrias que elaboran diferentes tipos de agregados livianos. Para producir hormigones livianos convencionales, es frecuente el uso de materiales como la piedra pómez, el poli estireno, esquisto, las arcillas, escorias y pizarras expandidas [2].

La mayoría del esquisto procede de las arcillas y lodos que han sufrido una serie de procesos metamórficos incluyendo la producción de pizarras y filitas como pasos intermedios. Algunos esquistos proceden de rocas ígneas de grano fino como basaltos y tobas. La mayoría de los esquistos son de mica, aunque también son frecuentes los de grafito y clorita. Algunos agregados livianos también son producidos por la aplicación de calor. En Figura 1 [3], se muestra la piedra de esquisto utilizado en el diseño de mezcla experimental.

Los esquistos metamórficos (como la pizarra) suelen usarse en la construcción, debido a que muchos son bastantes fuertes y duraderos. Los mismos se obtienen al calentar según se obtienen en el campo en un horno giratorio (temperatura entre 100 y 1200°C). Una vez que se produce la expansión del material por la producción de gases que quedan atrapados en el material hace que se produzca una

estructura porosa, de modo que la gravedad del material sea menor que el inicial [4].



Figura 1
Piedra de esquisto

El esquisto tiene una densidad de 40.58 a 56.19 lb/ft³. Los hormigones que se obtienen tienen densidades entre 87.4 a 112.37 lb/ft³. Tiene la ventaja de que se adquieren resistencias más elevadas que con cualquier otro agregado liviano [4].

La piedra de esquisto utilizada en este proyecto proviene de la compañía Northeast Solite Corporation ubicada en Brooks, Kentucky en los Estados Unidos de América. La hormigonera en Puerto Rico que proveyó directamente este producto para el proyecto fue Star Ready Mix Inc., la cual ha realizado diseños de mezcla de hormigón con dicha piedra.

METODOLOGÍA

Se realizaron dos (2) diseños de mezclas de hormigón estructural, siguiendo los pasos de las referencias [5 - 7]: una experimental de peso liviano y otra control de peso normal. Las proporciones de cada uno de los componentes de la mezcla control y de la experimental se muestran en las Tablas 1 y 2, respectivamente. La mezcla de hormigón liviano estructural se diseñó considerando la piedra de esquisto o roca de pizarra como agregado grueso, y la mezcla de hormigón de peso normal se diseñó con piedra regular llamada comúnmente como piedra azul. Las propiedades utilizadas para los diseños de cada una de las mezclas están contempladas en las

Tablas 3 y 4; las mismas fueron determinadas tanto de las pruebas de laboratorio como de las referencias [7 - 8]. Se prepararon un total de 12 cilindros donde 6 de ellos correspondían al diseño de la mezcla experimental y los otros 6 correspondían al diseño de la mezcla control. En las Figuras 2 y 3 se pueden observar la mezcla control y la experimental, respectivamente, antes de ser distribuidas en los distintos cilindros. Luego se pesaron y se le realizaron las pruebas en compresión a dos (2) cilindros de cada mezcla a los 7, 14 y 28 días. Las Figuras 4 y 5 muestran un ejemplo de la ruptura de tanto de la muestra control como la experimental, respectivamente.

También se realizó la prueba de absorción y granulometría de la piedra de esquisto o roca de pizarra para ver el comportamiento del mismo y comparar dichos datos con los datos brindados por la cantera que proveyó el material. Todos los procesos del laboratorio se llevaron a cabo siguiendo los parámetros de los ASTM & ACI correspondientes [6 - 18].

Tabla 1
Diseño de Mezcla Control

Cemento	15.22 lbs
Agregado Grueso	51.59 lbs
Agua	8.36 lbs
Agregado Fino	30.55 lbs
Total	105.72 lbs

Tabla 3
Diseño de Mezcla Experimental

Cemento	15.93 lbs
Agregado Grueso	20.08 lbs
Agua	7.86 lbs
Agregado Fino	37.78 lbs
Total	81.64 lbs

Tabla 2
Propiedades de Materiales Mezcla Control

$SG_{\text{Agregado Fino}}$	2.65
SG_{cemento}	3.15
$SG_{\text{Agregado Grueso}}$	2.69
Tamaño del agregado grueso	1.00 in
$\Upsilon_{\text{Agregado Grueso}} (\text{lb}/\text{ft}^3)$	105 lb/ft^3
Modulo de Fineza	2.6
Υ_{agua}	62.43 lb/ft^3
$W_{\text{agua}} (\text{lb}/\text{yd}^3 \text{ de concreto})$	325 lb/yd^3
$\%V_{\text{aire}}$	2.00 %
% Absorción Agregado Grueso	0.8 %
% Humedad Agregado Grueso	2.00 %
% Absorción Agregado Fino	6.00 %
% Humedad Agregado Fino	8.00 %

Tabla 4
Propiedades de Materiales Mezcla Experimental

$SG_{\text{Agregado Fino}}$	2.65
SG_{cemento}	3.15
$SG_{\text{Agregado Grueso}}$	1.46
Tamaño del agregado grueso	0.75 in
$\Upsilon_{\text{Agregado Grueso}} (\text{lb}/\text{ft}^3)$	43.2 lb/ft^3
Modulo de Fineza	2.6
Υ_{agua}	62.43 lb/ft^3
$W_{\text{agua}} (\text{lb}/\text{yd}^3 \text{ de concreto})$	340 lb/yd^3
$\%V_{\text{aire}}$	2 %
% Absorción Agregado Grueso	10.3 %
% Humedad Agregado Grueso	2 %
% Absorción Agregado Fino	6 %
% Humedad Agregado Fino	8.00 %

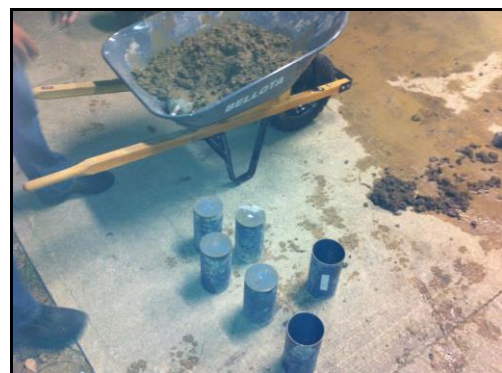


Figura 2
Mezcla Control



Figura 3
Mezcla Experimental



Figura 4
Fallas en Prueba de Compresión Mezcla Control



Figura 5
Fallas en Prueba de Compresión Mezcla Experimental

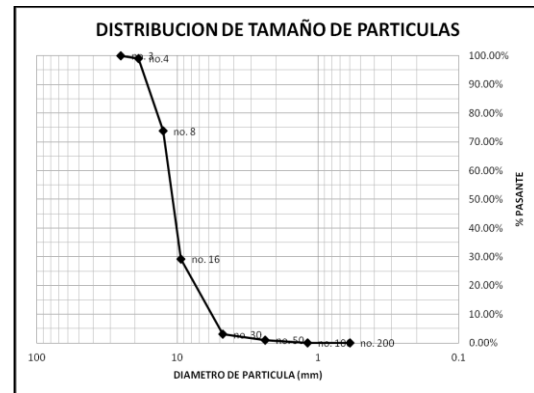
RESULTADOS

Se realizó la prueba de granulometría del agregado liviano y se compararon los valores con los valores especificados por ASTM [9]. Los resultados se presentan en la Tabla 5 y la Gráfica 1.

Luego se realizó la prueba de absorción siguiendo las especificaciones de ASTM [10]. Los datos obtenidos están contenidos en la Tabla 6.

Tabla 5
Granulometría agregados grueso (Kentucky Solite)

Designación de Tamiz	Peso Acumulado (kg)	% Acumulado	% Pasante	Especificaciones ASTM	
1 1/2 in	-	-	-		
1 in	0.00	0.00%	100.00%		
3/4 in	0.05	1.01%	98.99%	90 @ 100	OK
1/2 in	1.25	26.26%	73.74%	-	
3/8 in	2.20	70.71%	29.29%	10 @ 50	OK
No. 4	1.30	96.97%	3.03%	0 @ 15	OK
No. 8	0.10	98.99%	1.01%	-	
No. 16	0.00	0.00%	n/a	-	
No. 30	0.00	0.00%	n/a	-	
No. 50	0.00	0.00%	n/a	-	
No. 100	0.00	0.00%	n/a	-	
No. 200	0.00	0.00%	n/a	-	
PAN	0.05	100.00%	0.00%		



Gráfica 1
Granulometría

Tabla 6
Prueba de Absorción

W_{seco} (lbs)	$W_{\text{superficie saturada}}$ (lbs)	Absorción = $M_{\text{SSD}} - M_{\text{seco}} / M_{\text{seco}}$
0.1294	0.1426	10.21%

En las Tablas 7 y 8 se encuentran resumidos los resultados de las pruebas de compresión a los 7, 14 y 28 días, los pesos unitarios y los tipos de fracturas de cada uno de los cilindros evaluados. En la Gráfica 2 se muestra la comparación de los

resultados promedios de la capacidad en compresión presentó resistencias en compresión mayores a las de las mezclas. Se puede observar de los resultados de la mezcla control. presentados que la mezcla de hormigón liviano

Tabla 7
Prueba de Compresión Mezcla Control

Mezcla Experimental	Temperatura (°F)	Caída (in)	Carga aplicada (lbf)	7 días	% of 4,200 psi	Peso (gr)	Peso (lbf)	Y _{muestra} (lb/ft)	Tipo de Fractura
Cilindro #1	82.5	4.00	43,355.0	3,450.18	82.15%	3,059.0	6.7	115.9	Tipo 1
Cilindro #2	82.5	4.00	46,475.0	3,698.47	88.06%	3,080.0	6.8	116.7	Tipo 3

	Temperatura (°F)	Caída (in)	Carga aplicada (lbf)	14 días	% of 4,200 psi	Peso (gr)	Peso (lbf)	Y _{muestra} (lb/ft)	Tipo de Fractura
Cilindro #3	82.5	4.00	50,190.0	3,994.11	95.10%	3,110.0	6.9	117.9	Tipo 5
Cilindro #4	82.5	4.00	51,420.0	4,091.99	97.43%	3,081.0	6.8	116.8	Tipo 5

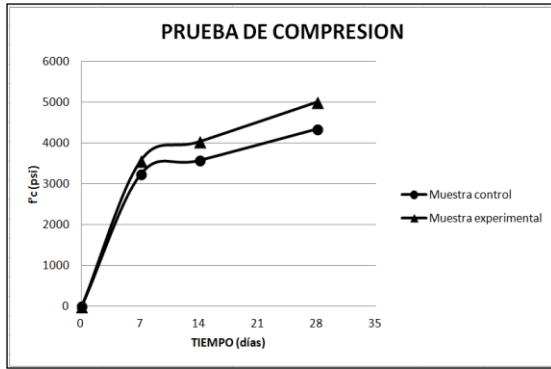
	Temperatura (°F)	Caída (in)	Carga aplicada (lbf)	28 días	% of 4,200 psi	Peso (gr)	Peso (lbf)	Y _{muestra} (lb/ft)	Tipo de Fractura
Cilindro #5	82.5	4.00	63,645.0	5,064.86	120.59%	3,153.0	7.0	119.5	Tipo 5
Cilindro #6	82.5	4.00	62,415.0	4,966.97	118.26%	3,133.0	6.9	118.7	Tipo 5

Tabla 8
Prueba de Compresión Mezcla Experimental

Mezcla Control	Temperatura (°F)	Caída (in)	Carga aplicada (lbf)	7 días	% of 4,200 psi	Peso (gr)	Peso (lbf)	Y _{muestra} (lb/ft)	Tipo de Fractura
Cilindro #1	81.6	4.00	40,010.0	3,183.99	75.81%	3,900.0	8.6	147.8	Tipo 3
Cilindro #2	81.6	4.00	41,200.5	3,278.73	78.06%	3,800.0	8.4	144.0	Tipo 3

	Temperatura (°F)	Caída (in)	Carga aplicada	14 días	% of 4,200 psi	Peso (gr)	Peso (lbf)	Y _{muestra} (lb/ft)	Tipo de Fractura
Cilindro #3	81.6	4.00	45,030.2	3,583.50	85.32%	3,782.0	8.3	143.3	Tipo 3
Cilindro #4	81.6	4.00	44,780.7	3,563.64	84.85%	3,788.0	8.4	143.6	Tipo 5

	Temperatura (°F)	Caída (in)	Carga aplicada	28 días	% of 4,200 psi	Peso (gr)	Peso (lbf)	Y _{muestra} (lb/ft)	Tipo de Fractura
Cilindro #5	81.6	4.00	55,320.4	4,402.39	104.82%	3,734.9	8.2	141.6	Tipo 3
Cilindro #6	81.6	4.00	53,830.0	4,283.78	101.99%	3,687.9	8.1	139.8	Tipo 5



Gráfica 2
Prueba de compresión

CONCLUSIÓN

Luego de analizar los datos obtenidos a lo largo del proyecto se pudo determinar que la mezcla experimental en comparación con la mezcla control obtuvo los mejores valores y desempeños, tanto en las pruebas de compresión como en las pruebas de densidad.

Este agregado grueso (piedra de esquisto) proveniente del estado de Kentucky en Estados Unidos resultó ser costoso a causa del transporte de dicho material hacia la isla de Puerto Rico. Aproximadamente estos costos de transporte hacia la isla fluctúan entre los \$200 @ \$250 por cada tonelada del material. Estos altos costos de transporte causan que los costos por cada yarda cubica del hormigón liviano estructural de resistencia regular (3,000psi) obtenga un costo unitario de aproximadamente \$240 en comparación con \$110 por cada yarda cubica de hormigón de resistencia y densidad regular.

Como resultado de esta comparación de precios unitarios y costos de transporte se logró obtener un tipo de mezcla económicamente viable para la construcción de extensiones verticales de varios niveles encima de estructuras existentes las cuales no resistirían las cargas muertas producidas por hormigones de densidades regulares.

REFERENCIAS

[1] CIB. (12 de 1 de 2014). www.cib.espol.edu.ec. Recuperado el 15 de 2 de 2014, de www.cib.espol.edu.ec:

http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D_Tesis_PDF/D-38822.pdf.

- [2] URBIPEDIA. (21 de 1 de 2014). www.urbipedia.org. Recuperado el 6 de 2 de 2014, de www.urbipedia.org: http://www.urbipedia.org/index.php/Agregado_liviano.
- [3] CED. (13 de 2 de 2014). www.ced.ltd.uk. Recuperado el 16 de 2 de 2014, de www.ced.ltd.uk: <http://www.ced.ltd.uk/gravels/aggregates/>.
- [4] IMCYC. (18 de 12 de 2013). www.imcyc.com. Recuperado el 26 de 1 de 2014, de www.imcyc.com: <http://www.imcyc.com/ct2009/jul09/tecnologia.htm>.
- [5] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese, *Design and Control of Concrete Mixtures* 14th Edition.
- [6] ACI 213R-03, *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, www.concrete.org.
- [7] ACI 211.1-91, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, www.concrete.org.
- [8] ASTM C330-09, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.
- [9] ASTM Standard C 136 – 08 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Course Aggregates.
- [10] ASTM Standard C 128 Standard Test Methods for Percentage of Absorption.
- [11] ACI 211.2-98, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, www.concrete.org.
- [12] ACI 318-11, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, www.concrete.org.
- [13] ASTM C29-09, Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate.
- [14] ASTM Standard C 39/C 39M – 01 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [15] ASTM Standard C 40 Standard Specification for Organic Impurities.
- [16] ASTM Standard C 33 – 02 Standard Specification for Concrete Aggregates.
- [17] ASTM Standard C 131 – 06 Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine.
- [18] ASTM Standard D 854 - 10 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.