

Estudio del concreto de alta resistencia con el uso de cenizas de materiales orgánicos y polímeros

Study of high strength concrete with the use of organic material ash and polymers

Lidia I. Aizpurúa^{1*}, Genneva M. Moreno¹, Karen Caballero¹

¹ Grupo de investigación CITEC, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: aizpurua.lidia@gmail.com

RESUMEN— El concreto de alta resistencia es uno de los avances más destacados en la industria de la construcción debido a sus múltiples ventajas, sin embargo, también presenta características desfavorables como la fragilidad. Se evaluó el efecto combinado de la adición de caucho y cenizas procedentes de materiales orgánicos al concreto de alta resistencia con el objetivo de mejorar sus propiedades, principalmente la resistencia a compresión y la ductilidad. Estudios previos demuestran que las cenizas de materiales orgánicos contribuyen a aumentar la resistencia a compresión, mientras que el caucho reduce la fragilidad del concreto de alta resistencia. La proporción de cenizas estuvo basada en el peso del cemento, mientras que la dosificación de caucho se hizo con base en el peso total de la mezcla de concreto. La investigación se desarrolló en dos fases; durante la primera de ellas se realizaron pruebas de resistencia a compresión de cilindros de concreto para dos proporciones de ceniza de cáscara de huevo (1.5% y 2.0%), dos proporciones de ceniza de cascarilla de arroz (1.5% y 2.0%), además de la mezcla base para determinar el porcentaje óptimo de ceniza. En la segunda fase, se ensayaron especímenes cilíndricos para determinar la resistencia a compresión, y viguetas para determinar la capacidad de carga a flexión y deformación, para cinco mezclas de concreto con la adición del porcentaje óptimo de ceniza determinado en la fase anterior y la adición de caucho molido en proporciones de 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%.

Palabras clave— Cáscara de arroz, cáscara de huevo, caucho, ceniza, concreto de alta resistencia, ductilidad.

ABSTRACT— High strength concrete is one of the most noteworthy breakthroughs in the construction industry due to various benefits, nonetheless, it also exhibits some adverse traits such as fragility. The combined effect of the addition of rubber and organic material ash to high strength concrete was evaluated, with the aim to enhance its properties, primarily its compressive strength and ductility. Previous studies demonstrate that organic material ash increases compressive strength, while rubber reduces the fragility of high strength concrete. Eggshell ash was added by weight of cement, and rubber was added by total weight of concrete. The research process was divided in two phases; during the first phase, cylindrical specimens were subjected to compressive strength tests for two proportions of eggshell ash (1.5% and 2.0%), two proportions of rice husk ash (1.5% and 2.0%), and the reference mixture, in order to determine the optimum content of ash. During the second phase, cylindrical specimens were tested to determine the compressive strength, and beams were tested to determine the flexural strength and deformation capacity, for five concrete mixtures with the addition of the optimum content of ash determined in the previous phase and the addition of crumb rubber in proportions of 0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0%.

Keywords— Rice husk, eggshell, rubber, ash, high strength concrete, ductility.

1. Introducción

El concreto de alta resistencia es definido por el ACI 211.4R-08 como aquel cuya resistencia especificada supera los 40 MPa [1]. En la actualidad, el concreto de alta resistencia es reconocido por los ingenieros diseñadores como un material con gran rendimiento, ya que se ha logrado la construcción de estructuras mucho más esbeltas, lo que se traduce en mayores espacios y ganancias para los propietarios de edificios. Además, ha permitido que el proceso de desencofrado de las estructuras se realice mucho antes, lo cual también representa una enorme ventaja.

Por otro lado, se ha hecho posible la construcción de estructuras de mayor altura, aumentando la rigidez de las mismas y reduciendo las deformaciones de los elementos. El incremento en la rigidez lateral de los edificios, reduce el balanceo causado por las cargas de viento y permite un mayor nivel de comodidad para los ocupantes.

Se ha observado también que el uso de este tipo de concreto permite la incorporación de estructuras de acero mucho más livianas, lo que disminuye la carga muerta de los edificios y permite que pueda construirse sobre suelos con menor capacidad de soporte.

A pesar de todas las ventajas mencionadas, al utilizar concreto de alta resistencia debe tomarse en consideración que este material presenta gran fragilidad. Tal característica adversa es una de las razones por las cuales en ocasiones se descarta su uso, ya que los materiales frágiles son propensos a fallar de manera abrupta, contrario a lo que ocurre con un material dúctil donde posibilidad de falla es evidenciada por deformaciones en la estructura.

En la presente investigación se ha decidido utilizar cenizas de cáscara de huevo, cenizas de cascarilla de arroz, y caucho molido para mejorar las características del concreto de alta resistencia.

Las cenizas de cáscara de huevo y de cascarilla de arroz han sido utilizadas como adición al concreto normal, obteniéndose resultados favorables de incremento en la resistencia a compresión [2]. Las cenizas de cáscara de huevo son ricas en óxido de calcio (CaO), el cual es fundamental en la producción de los principales compuestos cementantes encargados de conferir sus propiedades al cemento Portland y del desarrollo de su resistencia [3]. Por otra parte, las cenizas de cascarilla de arroz presentan un gran nivel de actividad puzolánica debido a su alto contenido de sílice (SiO₂).

Por otro lado, se ha observado que el concreto con adiciones de caucho presenta mayor ductilidad y capacidad de disipación de energía [4]. Este fenómeno se debe a las propiedades elásticas que exhibe dicho material.

El objetivo de la investigación es estudiar el efecto de la adición de caucho y cenizas de materiales orgánicos en la resistencia a compresión y la capacidad de deformación del concreto de alta resistencia. En la actualidad se dispone de pocos estudios y normas enfocados en las propiedades del concreto de alta resistencia, y por esta razón, se espera que con los resultados de la presente investigación sea posible actualizar y ampliar el conocimiento y las normativas de construcción referentes al tema.

El presente artículo inicia con una descripción de la metodología empleada para la dosificación de las adiciones en cada fase del estudio. Posteriormente, se detallará el procedimiento utilizado para los ensayos durante la campaña experimental, y finalmente se analizarán los resultados obtenidos para plantear las conclusiones.

2. Metodología

El procedimiento experimental utilizado se divide en dos fases. La Fase I se centra en la selección de los porcentajes óptimos de ceniza; tanto de cáscaras de huevo como cascarilla de arroz. La segunda fase tendrá por objetivo la utilización de los porcentajes óptimos de cada tipo de ceniza, adicionando además diferentes porcentajes de caucho.

Se ha demostrado que la adición de cenizas tanto de cáscaras de huevo como cascarilla de arroz en proporciones de 0.5% a 2.0% presentan mejoras en cuanto a la ganancia de resistencia a compresión en el concreto normal, generando aumentos de resistencia de 20% a 25% [3]. A partir de esto se establecen las dos proporciones a utilizar de cada tipo de ceniza (1.5% y 2.0%) durante la primera fase, se escogerá el porcentaje óptimo de cada tipo de ceniza que brinde los mejores resultados en cuanto a la resistencia a compresión.

Por otro lado, se han realizado estudios experimentales sobre la adición de caucho reciclado de neumáticos a las mezclas de concreto, donde por eficiencia de trabajabilidad y propiedades mecánicas que presenta el concreto, las adiciones de caucho a las que se limitaron fueron de 3.5% y 5% en volumen del concreto, limitándose hasta un 8% de adición caucho [5]. Con la finalidad de conocer el comportamiento del concreto de alta resistencia con la adición de caucho y basándonos los resultados de investigaciones previas como la antes citada, se establece en esta investigación que la dosificación para el caucho en la mezcla de concreto será de cuatro porcentajes distintos: 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0% del peso del concreto. Esta adición de caucho corresponde a la segunda fase de esta investigación donde además de la incorporación de estas fibras se incluirá el porcentaje de ceniza óptimo obtenido, tanto para la ceniza de cáscaras de huevo como para la ceniza de cascarilla de arroz y que serán escogidos a partir de los ensayos realizados en la primera fase.

3. Programa Experimental

Se detalla el procedimiento de obtención de las cenizas y los ensayos normalizados utilizados para la obtención de resultados.

3.1 Obtención de la ceniza

El procedimiento de obtención de cada tipo de ceniza depende de la naturaleza de la misma. Durante este estudio se realizaron diferentes procesos para obtener la cantidad y calidad de la ceniza requerida. Los mismos se especifican a continuación.

3.1.1 Ceniza de cáscaras de huevo

Para la obtención de las cenizas de cáscaras de huevo, se procede a secar las cáscaras de manera natural al sol. Luego de esto se trituran parcialmente para que el tiempo de incineración sea menor, ya que el tamaño influye grandemente en el tiempo que demora este proceso.

Finalmente se incineran durante aproximadamente tres horas hasta obtener un polvo de color gris. Posterior a la calcinación de las cáscaras de huevo, la ceniza obtenida aún no tiene el tamaño adecuado, por lo que se procede a la maceración de la misma con la utilización de un mortero con pistilo para reducir el tamaño y obtener una mayor finura en la ceniza.

La figura 1 muestra el aspecto de las cenizas inmediatamente después de su calcinación y luego de ser macerada.



Figura 1. Ceniza de cáscaras de huevo posterior de su calcinación (izquierda) y ceniza de cáscara de huevo macerada hasta obtener la finura óptima (derecha).

3.1.2 Ceniza de cascarilla de arroz

La cascarilla fue obtenida de un molino de la localidad donde ya estaba previamente incinerada; sin embargo, debido a que presentaba un alto porcentaje de humedad se procedió a secarla en un horno eléctrico durante aproximadamente 24 horas, obteniendo una ceniza con buen nivel de finura como se muestra en la figura 2.



Figura 2. Ceniza de cascarilla de arroz con porcentaje de humedad (izquierda) y ceniza de cascarilla de arroz después de 24 horas en el horno eléctrico (derecha).

3.2 Ensayos Normalizados

Se describen a continuación las normas bajo las cuales se realizaron los ensayos normalizados de los especímenes fabricados durante esta investigación.

3.2.1 Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto según la Norma ASTM C 39-17b

Este método permite determinar la resistencia a la compresión del concreto aplicando una carga axial a los especímenes cilíndricos y luego se calcula su resistencia, dividiendo la carga soportada entre el área de la sección transversal [6].

3.2.2 Resistencia a la flexión en viguetas de concreto según la Norma UNE-EN 14651:2007

Norma europea utilizada para determinar la resistencia a la tracción por flexión del concreto con fibras metálicas no mayores de 60 mm. Dicha Norma permite que se pueda medir por medio de un sensor de desplazamiento lineal la abertura provocada por la carga aplicada justamente a la mitad de la vigueta.

Para realizar este ensayo se debe efectuar una entalla a las probetas utilizando un método de aserrado tipo húmedo. El transductor de desplazamiento lineal se debe instalar a lo largo del eje longitudinal, en la mitad de la anchura de la vigueta y en el centro de la entalla de modo que permita medir los desplazamientos producidos por la carga aplicada, como se muestra en la figura 3.



Figura 3. Colocación del sensor de desplazamiento lineal sobre la vigueta.

La vigueta deberá ser colocada sobre rodillos que deben ser de acero, emulando una viga simplemente apoyada. La distancia a la que se colocaran los rodillos será de 25 mm medidos a partir del borde. Una vez colocada la vigueta de manera correcta se procede a aplicar la carga justo en el centro del vano [7].

3.2.3 Resistencia a compresión de cubos de mortero según la Norma ASTM C 109-16a

Describe el método para elaborar cubos de mortero y ensayarlos adecuadamente [8]. En el presente estudio, se requiere determinar la resistencia a compresión del mortero base y el mortero adicionado con cenizas de cáscara de huevo, para comparar el aumento de resistencia causado únicamente por las cenizas orgánicas ensayándolos a los 7, 14 y 28 días.

4. Análisis de resultados

Los resultados se presentan en dos fases. La primera fase consiste en ensayos de resistencia a compresión realizada a las mezclas que contienen cenizas de cáscara de huevo y cascarilla de arroz. La segunda fase comprende ensayos de resistencia a compresión y flexión para mezclas de concreto con adición de cenizas de materiales orgánicos y caucho.

4.1 Fase I

Se centra en la selección de los porcentajes óptimos de ceniza; tanto de cáscaras de huevo como cascarilla de arroz. A partir de las dos proporciones antes establecidas (1.5% y 2.0%), se escogerá el porcentaje de cada material que brinde los mejores resultados en cuanto a la resistencia a compresión.

Cabe destacar que durante la investigación por conveniencia se utilizarán algunas abreviaturas que

permitirán facilitar la redacción y comprensión de esta investigación como se especifica a continuación:

B = Mezcla base sin adición de ceniza

1.5H = Mezcla con 1.5% ceniza de cáscaras de huevo

2.0H = Mezcla con 2.0% ceniza de cáscaras de huevo

1.5A = Mezcla con 1.5% ceniza de cascarilla de arroz

2.0A = Mezcla con 2.0% ceniza de cascarilla de arroz

3.0A = Mezcla con 3.0% ceniza de cascarilla de arroz

4.1.1 Ensayo de resistencia a compresión de cilindros de concreto

La tabla 1 muestra los resultados de las fallas observadas en los cilindros de concreto ensayados durante esta fase.

Tabla 1. Tipo de falla de cilindros a 7 y 28

Denominación	Tipo de Falla	
	7 días	28 días
B	5	EXP
	5	EXP
1.5H	5	5
	5	EXP
2.0H	5	EXP
	EXP	-
1.5A	5	5
	5	5
2.0A	5	EXP
	5	EXP
3.0A	5	EXP
	5	EXP

Como se puede observar la mayoría de los cilindros presentaron un tipo de falla especificado como tipo V en la norma ASTM C 39-17b [9], a los 7 días tanto en los cilindros con adición de cenizas como para la mezcla base. Posteriormente a la edad de 28 días se presentó una falla especificada como tipo explosivo (EXP) no descrita en la norma, este comportamiento puede ser atribuido a la naturaleza frágil del concreto de alta resistencia y a las elevadas cargas aplicadas sobre los cilindros, lo que provoca que en este caso falle el agregado grueso y no la pasta como ocurre en el concreto normal.

La figura 4 muestra la comparación entre una falla tipo V observada a los 7 días y una falla tipo explosivo presentada a los 28 días.



Figura 4. Falla tipo V mezcla con 1.5A a los 7 días (izquierda) y falla tipo EXP en mezcla 2.0H a los 28 días.

La tabla 2 muestra la resistencia a compresión promedio presentada por los cilindros ensayados a los 28 días y el porcentaje de aumento de la resistencia respecto a la mezcla base.

Como puede observarse en la tabla, el aumento en cuanto a la resistencia a compresión lo brinda la ceniza de cáscaras de huevo, ya que al adicionar ceniza de cascarilla de arroz se produjo disminución respecto a la mezcla base. Para comprobar este hecho se utilizó un nuevo porcentaje de ceniza (3.0A) con el cual se pudo ver que a medida que aumenta el porcentaje de ceniza de cascarilla de arroz la resistencia a compresión disminuye.

Tabla 2. Esfuerzo a compresión en cilindros de concreto a los 28 días de edad

Mezcla	Esfuerzo (MPa)	Esfuerzo Promedio (MPa)	% de aumento o disminución de la resistencia respecto a B
B	63.61	64.17	-
	64.73		
1.5H	70.99	69.70	8.62
	68.41		
2.0H	68.41	68.41	6.61
1.5A	62.42	62.42	-2.73
	62.41		
2.0A	59.98	60.59	-5.58
	61.21		
3.0A	59.77	59.01	-8.04
	58.26		

La figura 5 muestra de manera gráfica el comportamiento de la resistencia a compresión de los cilindros de concreto tanto para la mezcla base como para las mezclas adicionadas con cenizas. Se puede observar de manera clara cómo las adiciones de ceniza de cáscaras de huevo provocan el aumento de la resistencia a compresión respecto a la mezcla base y cómo la adicción de ceniza de cascarilla de arroz provoca la disminución de la resistencia. En base a esto se toma la decisión de no utilizar ningún tipo de adición de ceniza de cascarilla de arroz durante la fase II y se escoge como porcentaje óptimo de ceniza 1.5H el cual registra un aumento de la resistencia a compresión de 8.62% de la misma respecto a la mezcla B.

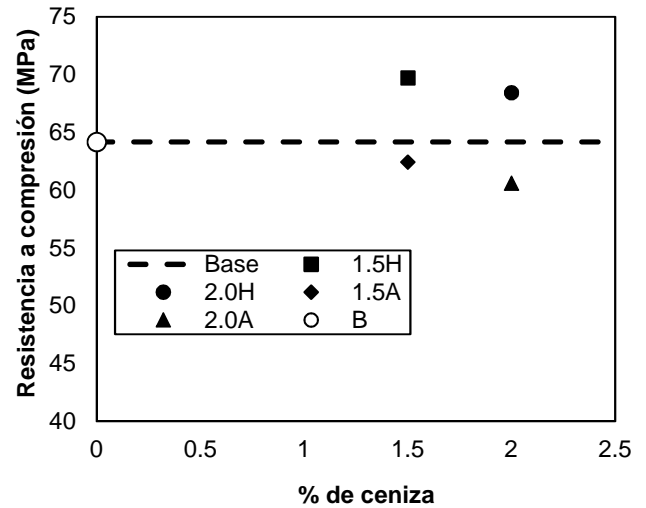


Figura 5. Resistencia a compresión a los 28 días.

4.1.2 Ensayo de resistencia a la compresión de cubos de mortero

Para conocer el aporte que brinda la ceniza en cuanto al aumento de la resistencia a compresión se ensayaron cubos de mortero. Los mismos se realizaron mediante una mezcla base sin adición de cenizas y para una mezcla con adición del porcentaje óptimo de cenizas de cáscaras de huevo (1.5%), lo que permitirá estudiar el aporte de las cenizas solo como mortero.

La tabla 3 muestra los resultados de los ensayos realizados a los 7, 14 y 28 días, se puede observar claramente que a edades tempranas la ceniza aun no aporta en cuanto al aumento de la resistencia a compresión, este aumento de resistencia se ve reflejado en edades posteriores como se pudo constatar donde los cubos de mortero que contenían adición de ceniza de

cáscaras de huevo presentaban aumento en cuanto a la resistencia a compresión respecto a la mezcla base.

Tabla 3. Resistencia a compresión en cubos de mortero para mezcla base y porcentaje óptimo de cenizas de cáscaras de huevo

Edad	Mezcla	Fuerza (N)	Esfuerzo Promedio (MPa)
7 días	B	27066.35	10.92
		27556.69	
	1.5H	27458.62	10.61
		25595.36	
14 días	B	35274.52	14.12
		32332.53	
	1.5H	34852.83	14.25
		36392.48	
28 días	B	39658.09	16.46
		42639.31	
	1.5H	42649.12	17.25
		43600.37	

4.2 Fase II

A partir de la selección del porcentaje óptimo de ceniza determinado durante la primera fase, se procede a estudiar el comportamiento de las mezclas de concreto de alta resistencia mejoradas con ceniza al agregarle determinados porcentajes de caucho molido.

Se realizaron ensayos de resistencia a compresión para cilindros de concreto y de resistencia a flexión para viguetas, en 5 amasadas que contienen 1.5% de ceniza de cáscara de huevo (H) con base en el peso del cemento y porcentajes variados de caucho molido (C) (0%, 0.5%, 1.0%, 1.5% y 2.0%) con base en el peso total de la mezcla de concreto.

4.2.1 Ensayo de resistencia a compresión de cilindros de concreto

En la tabla 4 se muestra el tipo de falla de los cilindros a ambas edades. Se aprecia que en los especímenes de la mezcla base se produjo una falla de tipo explosivo (EXP) la cual se debe a que la pasta del concreto de alta resistencia es más fuerte que los agregados, y por tal razón, la falla ocurre con una gran liberación de energía al romperse el agregado.

Tabla 4. Tipo de falla de cilindros a 7 y 56 días

Denominación	Tipo de falla a 7 días	Tipo de falla a 56 días
Base (1.5H)	5	2
	EXP	EXP
1.5H+0.5C	5	5
	5	5
1.5H+1.0C	5	5
	3	5
1.5H+1.5C	3	5
	5	5
1.5H+2.0C	5	5
	5	5

Por otro lado, se observa que las mezclas que contienen caucho fallan según los patrones típicos descritos en la norma ASTM C 39-17b [6]. El caucho evita la falla explosiva ya que las partículas de este material contribuyen a la disipación energética y redirigen los esfuerzos que ocasionan la ruptura del cilindro. Esto quiere decir que la adición de caucho contribuye a reducir la fragilidad del concreto de alta resistencia.

La figura 6 muestra una comparación entre una falla de tipo explosivo y una falla típica.



Figura 6. Falla explosiva de cilindro 1.5H (izquierda) y falla tipo 5 de cilindro 1.5H+0.5C (derecha).

La tabla 5 presenta la resistencia a compresión promedio de cada mezcla a los 56 días. Se observa que al agregar caucho al concreto, se reduce su resistencia a compresión. Este fenómeno se debe a la falta de adherencia entre el caucho y la pasta de cemento [9].

Tabla 5. Resistencia a compresión a los 56 días

Denominación	Resistencia promedio (MPa)	Reducción con respecto a la base
Base (1.5H)	71.63	---
1.5H+0.5C	55.13	23.0%
1.5H+1.0C	57.77	19.3%
1.5H+1.5C	53.41	25.4%
1.5H+2.0C	47.73	33.4%

Por otro lado, en la figura 7 es posible observar que existe una tendencia en el comportamiento de la resistencia a compresión a medida que se adiciona caucho al concreto. El resultado más favorable se obtiene al agregar 1.0% de caucho, con una reducción en resistencia a compresión de 19.3% con respecto a la mezcla base. A partir de allí, cualquier aumento en el contenido de caucho ocasiona mayor reducción en la resistencia y por tanto no es factible.

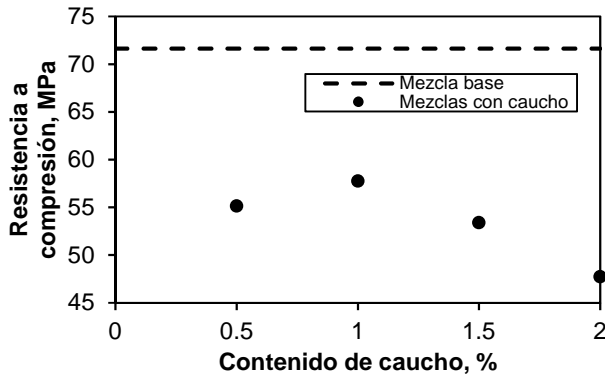


Figura 7. Resistencia a compresión a los 56 días.

4.2.2 Ensayo de resistencia a flexión de viguetas de concreto

Mediante este ensayo se determinó la carga a flexión que soportaban las viguetas, así como la abertura de fisura o desplazamiento al momento de la falla. El desplazamiento es una medida de la capacidad de deformación del concreto, con lo cual será posible determinar su ductilidad o fragilidad.

En la tabla 6 se presenta un resumen del comportamiento observado en las viguetas durante los ensayos de flexo-compresión. Cuando se habla de falla “completa”, se refiere a que la línea de falla se propagó a lo largo de toda la sección de la viga, quedando completamente separada, mientras que falla “incompleta” indica que la viga quedó unida en la

parte superior. El término “desviada” indica que la línea de falla zigzagueaba, contrario a cuando la viga se rompía siguiendo la línea central.

Tabla 6. Tipos de falla de las viguetas

Denominación	Descripción de la falla
Base (1.5H)	Completa, central
1.5H+0.5C	Completa, desviada
1.5H+1.0C	Completa, desviada
1.5H+1.5C	Incompleta, desviada
1.5H+2.0C	Incompleta, desviada

Se pudo detectar que las viguetas de la mezcla base (1.5H) presentaron una fractura abrupta dirigida a través del centro de la misma. Esto se justifica debido a que el concreto de alta resistencia es un material frágil y la viga no contenía ninguna adición que pudiese ayudar a soportar el esfuerzo en tensión.

Por otro lado, a medida que se ensayaban las viguetas con contenido de caucho se pudo definir un patrón, todas fallaban de manera gradual, lo cual se evidencia en una desviación de la línea de falla con respecto al centro de la viga. Además, las viguetas con menor contenido de caucho (1.5H+0.5C y 1.5H+1.0C) quedaron separadas, mientras que aquellas con mayor contenido de caucho (1.5H+1.5C y 1.5H+2.0C) presentaron una falla incompleta. Las propiedades elásticas de las partículas de caucho son el factor responsable de este comportamiento debido a que las mismas se estiran ofreciendo resistencia a la propagación de la línea de falla.

En la figura 8 se muestra una comparación entre la falla de la viga de la mezcla base y una viga con contenido de caucho.

Al analizar la carga a flexión soportada por las viguetas, se observa que aquellas mezclas que contienen caucho presentan reducción en la resistencia a flexión. Este comportamiento también se debe a la falta de adherencia entre la pasta de cemento y el caucho, como se mencionó en el caso del ensayo de resistencia a compresión. El resultado más favorable se obtiene con la proporción de 2.0% de caucho, como se observa en la tabla 7.



Figura 8. Falla completa y dirigida a lo largo de la línea central en la vigueta de mezcla base (izquierda). Falla incompleta y desviada en vigueta de mezcla 1.5H+2.0C (derecha).

Tabla 7. Carga a flexión soportada por las viguetas

Denominación	Carga (kg)	Reducción en carga (%)
Base (1.5H)	2900	---
1.5H+0.5C	1700	41.4
1.5H+1.0C	1900	34.5
1.5H+1.5C	2000	31.0
1.5H+2.0C	2100	27.6

En la figura 9 se puede observar que después de la reducción inicial en resistencia a flexión con respecto a la mezcla base, a medida que se incrementa el contenido de caucho, se obtiene un mejor desempeño.

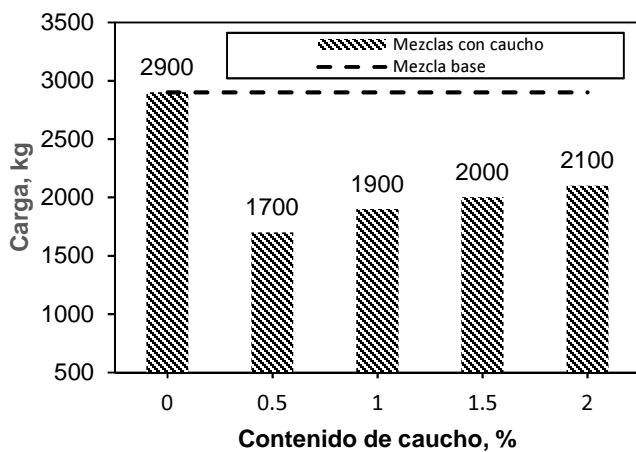


Figura 9. Carga a flexión soportada por las viguetas.

En cuanto a la capacidad de deformación, en la tabla 8 es posible observar que la adición de caucho aumenta significativamente la magnitud del desplazamiento que alcanzan las viguetas en el momento de la falla. El

resultado más favorable se obtiene con la mezcla de mayor contenido de caucho (1.5H+2.0C).

Tabla 8. Capacidad de deformación de las viguetas

Denominación	Desplazamiento (cm)	Aumento en desplazamiento (%)
Base (1.5H)	1.75	---
1.5H+0.5C	1.99	13.7
1.5H+1.0C	1.92	9.7
1.5H+1.5C	2.13	21.7
1.5H+2.0C	2.66	52.0

Además, cabe resaltar que la capacidad de deformación de todas las viguetas que contienen adición de caucho es mayor que la capacidad de la mezcla base. Como se aprecia en la figura 10, es posible definir una tendencia a mayor capacidad de deformación a medida que aumenta el porcentaje de caucho en la mezcla de concreto. Las propiedades elásticas de las partículas de caucho hacen posible que el concreto alcance mayores deformaciones antes de que ocurra la falla, es decir, que aumenta su ductilidad.

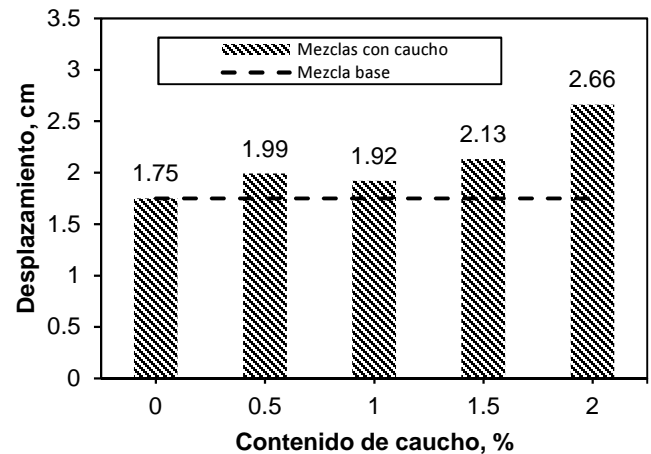


Figura 10. Capacidad de deformación de las viguetas.

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos ha sido posible plantear las siguientes conclusiones:

- El concreto de alta resistencia mejorado con cenizas de cáscara de huevo presentó un incremento de resistencia a compresión. Esto se debe a que la ceniza de cáscara de huevo es rica en óxido de calcio (CaO), el cual es fundamental para la formación de los

compuestos cementantes responsables del desarrollo de resistencia del cemento. La proporción óptima de ceniza de cáscara de huevo es 1.5%.

- La adición de ceniza de cascarilla de arroz reduce la resistencia a compresión del concreto.
- El concreto con adición de caucho presenta una disminución en la resistencia a compresión y a flexión. Esto se debe a la falta de adherencia entre el caucho y la pasta de cemento.
- El caucho reduce la fragilidad del concreto de alta resistencia. Esto se observa en el tipo de falla de los cilindros y las viguetas, y se comprueba con el aumento en la capacidad de deformación de las viguetas. En este sentido, la proporción de 2.0% de caucho es la más favorable.

6. Referencias

- [1] *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials*, ACI 211.4R-08, 2008.
- [2] E. Moreno y C. Velásquez, “Estudio experimental en la mejora de la resistencia del concreto con la adición de cenizas de materiales orgánicos,” Trabajo de fin de carrera, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, 2016.
- [3] M. Fernández. *Hormigón*. Madrid: Servicio de Publicaciones – Colección Escuelas, 2007.
- [4] H. Toutanji, “The use of rubber tire particles in concrete to replace mineral aggregates,” *Cement & Concrete Composites*, vol. 18, pp. 135-139, 1996.
- [5] Witoszek, B., Hernández, F., Alonso, M., Bollati, M., Parga, B., Barluenga, G., y Benito. C. “Hormigón con el caucho de recuperación de neumáticos usados y de polipropileno diseño del firme de hormigón de caucho”. VI Congreso Nacional de Firmes. León, España, 641-656.
- [6] *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM C 39-17b, 2017.
- [7] *Método de ensayo para hormigón con fibras metálicas. Determinación de la resistencia a la tracción por flexión*, UNE-EN 14651, 2007.
- [8] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2 inch or 50 mm Cube Specimens)*, ASTM C 109-16a, 2016.
- [9] S. Wong y S. Ting, “Use of recycled rubber tires in normal and high-strength concretes,” *ACI Materials Journal*, vol. 106, no. 4, 2009.