

Propiedades Geotécnicas y Elásticas de los Materiales de Resistencia Baja Controlada (MRBC)

P. Méndez de Hasbun, D. Barba, R. Escobar, A. Urbina, Departamento de Mecánica Estructural, UCA.

Resumen – Este artículo presenta los resultados obtenidos en pruebas de resistencia a compresión, módulo de elasticidad estático, triaxiales no consolidadas – no drenadas y consolidación llevadas a cabo en mezclas desarrolladas con un tipo de suelo (arena limosa) y un tipo de cemento (ASTM C 150 Tipo I).

Para evaluar los efectos de la edad, contenido de cemento y tipo de curado se realizaron ensayos a 7 y 28 días en especímenes elaborados con 3, 5 y 7% de cemento en peso. Estos, en su mayoría, fueron curados según la norma ASTM C 192/C 192M-02 exceptuando 42 especímenes a compresión simple de la mezcla con 3% de cemento.

La resistencia a compresión varió entre 4.1-7.7 kg/cm² a 7 días y 7.3-22.2 kg/cm² a 28. Se obtuvieron módulos de elasticidad entre 6214-19743 kg/cm². Ambas propiedades se incrementaron con el tiempo y el aumento del contenido de cemento. Sin embargo, la tasa de incremento de la resistencia fue mayor en aquellas mezclas con porcentajes de cemento superiores. Además, las muestras no curadas mostraron resistencias a compresión mayores a 28 días con respecto de aquellas que si lo fueron.

El análisis de los resultados de las pruebas triaxiales y de consolidación mostró que los especímenes presentaron un comportamiento dúctil a edades tempranas (parecido al de una arena limosa) y frágil a edades avanzadas. Los valores de ángulo de fricción interna permanecieron relativamente constantes con respecto a la edad y contenido de cemento de los especímenes, variando entre 34.4-42.7°. En cambio, los valores de cohesión experimentaron un incremento considerable con respecto a dichas variables, siendo entre 0.73-2.45 kg/cm² a 7 días y 1.03-4.68 kg/cm² a 28. Todas las mezclas resultaron ser muy poco compresibles para las edades estudiadas.

Índice de términos – Materiales de resistencia baja controlada, resistencia a compresión, resistencia a cortante, módulo de elasticidad.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de resistencia baja controlada (MRBC), localmente conocidos como lodocreto, son mezclas compuestas en su forma más básica por cemento, agua y agregados finos, cuyas características de fluidez y autocompactabilidad los vuelven materiales muy prácticos y útiles en diversas aplicaciones de la ingeniería civil. Estos son una tecnología relativamente nueva en el país, sin

embargo, su uso se ha ido extendiendo en los últimos años hasta el punto de ser utilizados en prácticamente todo tipo de obras civiles, entre las que resalta su utilización como materiales de relleno [7].

Además de las ya mencionadas características de fluidez y autocompactabilidad, los MRBC presentan muchas ventajas con respecto a otros materiales, entre éstas se destacan la

reducción de requerimientos de equipo, el uso de materiales no estandarizados para su elaboración y su excavabilidad. Dado que el ACI 116R define a los MRBC únicamente como materiales cementíceos con resistencias a compresión menores o iguales a 83 kg/cm^2 [1], durante su desarrollo se han experimentado con diferentes tipos de agregado como cenizas volantes, arena de fundición, vidrio de desecho, entre otros. En el país, el material más empleado en su elaboración es la tierra blanca, aunque se han llevado a cabo investigaciones utilizando ceniza de bagazo de caña y materiales arcillosos [7]. A pesar de dichas ventajas, los MRBC poseen un serio inconveniente: son estrictamente hablando materiales híbridos. Así, tal y como establece el ACI 229 [2], estos son materiales cementíceos cuyo comportamiento se asemeja más al de los suelos compactados, ubicándose en la frontera entre concreto y suelo. Dicha peculiaridad genera que los MRBC requieran de un tratamiento especial para su estudio, mezclando parámetros muy diversos.

Entre las propiedades más importantes y más estudiadas de los MRBC se encuentra la resistencia a compresión. Ésta es utilizada, junto con la fluidez, como parámetro de control de calidad e inclusive se usa como referencia para definir las características de excavabilidad y capacidad de soporte del material. No obstante, tal y como plantean Du, Folliard, Halmen, Leshchinsky, Trejo y Sabol [5], las investigaciones y métodos de diseño de dicho material deberían estar enfocadas a características y propiedades específicas para los usos en los que son requeridos.

Es bajo dicha perspectiva que en los últimos años se ha ido avanzando a nivel internacional en la búsqueda de nueva información que permita comprender de mejor manera el comportamiento de los MRBC, generando nuevos

procedimientos de prueba, control de calidad, especificaciones y criterios de diseño. Sin embargo, en El Salvador los MRBC siguen siendo un material técnicamente poco conocido. Las investigaciones llevadas a cabo a nivel nacional se han enfocado en la mayor parte de los casos en su resistencia a compresión, limitando el análisis de otras características.

En función de todo lo anterior, el presente artículo pretende abordar las propiedades geotécnicas y elásticas de un tipo particular de MRBC, brindando valores índices de módulo de elasticidad, cohesión, ángulo de fricción y su relación con la resistencia a compresión. Además, se busca analizar las características de deformabilidad de las mezclas y la influencia de los mecanismos de curado en dichas propiedades. Se reconocen las limitaciones de la investigación en cuanto a tipos y diversidad de MRBC trabajados, sin embargo se espera que éste sirva para sentar precedente y como motivación para la realización de más estudios que permitan un mayor conocimiento del comportamiento que tienen las mezclas de MRBC elaboradas con materiales locales.

MATERIALES Y METODOLOGÍA

A. *Materiales y Ensayos en Estado Fresco*

Las mezclas de MRBC estudiadas fueron desarrolladas a partir de un tipo de suelo y un único tipo de cemento, cuya selección se llevó a cabo tomando en cuenta las prácticas más usuales llevadas a cabo en el medio salvadoreño.

Basados en estos criterios, se decidió utilizar agregado de uno de los bancos de préstamo de la empresa HOLCIM® ubicado en Ateos, La Libertad. Para poder caracterizar adecuadamente el material y a manera de control de calidad se desarrollaron seis pruebas granulométricas (ASTM D 136-01), junto con ensayos de límites de consistencia (ASTM D 4318-

00), cuyos resultados generales son presentados en la Tabla I. Estos muestran que el suelo correspondía, según el sistema de clasificación SUCS (ASTM D 2487-00), a una arena limosa (SM) con una presencia considerable de pómez. Además de estas pruebas y con el objetivo de revisar la homogeneidad de las mezclas desarrolladas se elaboraron ensayos para calcular la gravedad específica del suelo. Sin embargo, dado que tanto la cantidad de finos como de arena presente en éste era considerable, se decidió calcular dicha propiedad separando sus componentes: grava (ASTM C 127-01), arena (ASTM C 128-01) y finos (ASTM D 854-02), para luego ponderar los resultados obtenidos en base a los porcentajes de cada uno. Dicho valor resultó en todos los casos igual a 2.29.

Por otra parte, se decidió utilizar cemento CESSA 5000 (ASTM C 150 Tipo I), con la finalidad de generar mezclas con la mayor resistencia a compresión posible. Esto último se dispuso debido a que la investigación se encontraba enfocada en aquellos MRBC utilizados para rellenos estructurales. Además, como parte del proceso de caracterización de los materiales se desarrollaron pruebas de peso específico en dicho componente, seis en total, cuyos resultados dieron como valor promedio 3.09.

TABLA I
GRADUACIÓN, LÍMITES DE CONSISTENCIA Y CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Composición		Malla	Porcentaje por peso
Grava	Gruesa	> 3/8 in	0
	Fina	3/8 in a No. 4	4-9
Arena	Gruesa	No. 4 a No. 10	4-10
	Media	No. 10 a No. 40	16 - 25
	Fina	No. 40 a No. 200	25 - 30
Finos		-	34 - 44
Límite Plástico		No plástico	
Índice de plasticidad		No plástico	
Clasificación SUCS		Arena Limosa (SM)	

A partir de estos parámetros, se definieron las mezclas a desarrollar en función de tres contenidos de cemento: 3, 5 y 7% en peso (2.2, 3.7 y 5.1% en volumen respectivamente).

Entre las limitaciones del estudio se estableció que únicamente se medirían las propiedades en mezclas cuya fluidez estuviera comprendida entre 8 – 10 in (ASTM D 6103-97), a edades de 7 y 28 días. Por otra parte, con el objetivo de poder desarrollar un análisis estadístico de los datos, para cada mezcla fueron elaboradas siete revolturas diferentes. De cada una éstas se elaboraban todos los especímenes requeridos para las pruebas de compresión, triaxial, módulo de elasticidad y consolidación para ambas edades de prueba.

Previo a la elaboración de dichos especímenes, y con la finalidad de garantizar la homogeneidad de las diferentes mezclas y revolturas elaboradas, se llevaron a cabo ensayos de fluidez y peso unitario y contenido de aire (ASTM D 6023-02), los cuales se realizaron inmediatamente después de elaborada cada revoltura. Los valores de peso unitario permitieron, además, la determinación de otras propiedades como el contenido de humedad (w), relación de vacíos (e), porosidad (n), grado de saturación (S) y grado de compactación (GC).

Los especímenes fueron moldeados y curados de acuerdo a lo estipulado en las normas ASTM D 4832-02 y C 192/C 192M-02. Sin embargo, con el propósito de evaluar los efectos del curado en la resistencia a compresión, se decidió elaborar cinco revolturas más para la mezcla con 3% de cemento las cuales recibieron un tratamiento particular. Así, todos los especímenes elaborados a partir de dichas revolturas no fueron sumergidos en agua con hidróxido de calcio, en cambio fueron únicamente cubiertos con bolsas plásticas. La Tabla II

enlista las principales propiedades de todas las mezclas investigadas.

TABLA II
MEZCLAS DE MRBC ESTUDIADAS

ID mezcla	Tipo de cemento	Tipo de suelo	% cemento en peso	Tipo de curado
M01	ASTM C 150 Tipo I	Arena Limosa	3%	Sumergido
M02				No curado
M03			5%	Sumergido
M04			7%	Sumergido

B. Ensayos en Estado Endurecido y Análisis Estadístico

El programa experimental se enfocó en evaluar las propiedades de cohesión y ángulo de fricción junto con su relación con la resistencia a compresión, para cada una de estas se elaboraron revisiones de aleatoriedad, intervalos de confianza para la media, y pruebas de hipótesis buscando generar índices confiables. Las demás propiedades fueron evaluadas de forma menos exhaustiva, pero no obstante brindaron un gran apoyo para el análisis del comportamiento de los MRBC. El detalle de las pruebas desarrolladas se presenta a continuación:

1) *Resistencia a Compresión No Confinada*: Se llevó a cabo según la norma ASTM D 4832-02 con especímenes cilíndricos de 6 in x 12 in, los cuales previo a su prueba, fueron dejados al aire 4 horas y posteriormente refrentados con azufre de acuerdo a la práctica ASTM C 617-98. Para cada edad de prueba y revoltura se utilizaron 3 especímenes, los cuales fueron ensayados en una máquina Tinius Olsen con capacidad de 100 t a una razón de carga entre 0.1288 a 0.5960 mm/min.

2) *Módulo de Elasticidad Estático y Módulo de Poisson*: Se realizó de acuerdo a la norma ASTM D 469-02 con especímenes cilíndricos de 6 in x 12 in. Previo a cada prueba

de módulo de elasticidad se realizó un ensayo de compresión no confinada. Los especímenes fueron preparados y refrentados según la norma ASTM C 617-98. El equipo utilizado fue el mismo que en las pruebas de resistencia a compresión, tomando lecturas a cada 100 lbf, hasta llegar aproximadamente al 50% de su resistencia a compresión (f_c). Los ciclos de carga se repitieron hasta obtener dos series de datos similares. Posteriormente se ensayó el espécimen a compresión simple.

3) *Consolidación Unidimensional*: Se realizó de acuerdo al método A de la norma ASTM D 2435-96, con especímenes de 2 in de diámetro labrados a partir de muestras cilíndricas de 3 in x 6 in. Éste tipo de prueba fue desarrollada a edades de 1, 7 y 28 días, sin llenar de agua la celda del consolidómetro. Para las muestras a 1 y 7 días se trabajó con incrementos de carga 25, 50, 100 y 200 kPa y decrementos a 100 y 0 kPa. En cambio, para los ensayos a 28 días los incrementos de carga fueron 50, 100, 200 y 400 kPa y decrementos a 200 y 0 kPa. En todos los casos la duración de los intervalos de carga fue de 24 horas.

4) *Pruebas Triaxiales No Consolidadas – No Drenadas*: A pesar de que según el tipo de suelo utilizado hubiera sido más conveniente la realización de ensayos en condición consolidado-drenado, el equipo con que se contaba solo permitía pruebas no consolidadas-no drenadas. Éstas se realizaron de acuerdo a la norma ASTM D 2850-95 con especímenes cilíndricos de aproximadamente 2.6 in x 5.4 in. Se utilizaron tres especímenes en cada ensayo con presiones de confinamiento de: 0.5, 1.0 y 1.5 kg/cm². El tipo de falla se consideró frágil, por lo que la velocidad de carga se calculó como 0.3% de deformación unitaria por minuto.

TABLA III
RESUMEN DE ENSAYOS POR MEZCLA

Ensayo	Norma ASTM	Mezcla	No. ensayos		No. especímenes		
			Por mezcla	Total	Por ensayo	Por mezcla	Total
Triaxial No Consolidado - No Drenado	D 2850-95	M01	10	46	3	30	138
		M02	10		3	30	
		M03	12		3	36	
		M04	14		3	42	
Compresión	D 4832-02	M01	14	56	3	42	168
		M02	14		3	42	
		M03	14		3	42	
		M04	14		3	42	
Consolidación	D 2435-96	M01	3	9	1	3	9
		M03	3		1	3	
		M04	3		1	3	
Módulo de elasticidad	C 469-94	M01	4	12	1	4	12
		M03	4		1	4	
		M04	4		1	4	

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Propiedades de los MRBC en Estado Fresco

Los resultados promedio obtenidos en las pruebas en estado fresco para cada una de las mezclas establecidas se presentan en la Tabla IV, en donde los valores entre paréntesis indican el coeficiente de variación (C.V.).

Se observa que los C.V. del contenido de aire son bastante altos. Si bien esto pudiera implicar falta de uniformidad de la mezcla, es de resaltar que el método de cálculo especificado por la norma ASTM D 6023-02 está basado en el conocimiento de las propiedades físicas de los materiales (gravedad específica, granulometría de los agregados, etc.), las cuales pueden variar de una revoltura a otra. Por lo cual no se considera argumento suficiente la variación del contenido de aire en las revolturas para establecer que hay diferencias significativas entre ellas. Así, dados los bajos valores de coeficiente de variación obtenidos para el resto de propiedades

en estado fresco medidas se considera que las revolturas desarrolladas para cada mezcla son lo suficientemente uniformes como para poder ser comparables entre sí.

TABLA IV
PROPIEDADES PROMEDIO DE LAS MEZCLAS DE MRBC EN ESTADO FRESCO

% cemento en peso	Peso volumétrico (kg/m ³)	Cont. de aire (%)	w (%)	e	n (%)	S (%)	GC (%)
3%	1563 (1.6)	7.1 (23.8)	39.9 (2.1)	1.067 (3.0)	51.6 (1.5)	86.3 (3.8)	77.6 (1.5)
5%	1585 (2.1)	5.6 (37.0)	40.4 (3.9)	1.042 (4.4)	51.0 (2.1)	89.7 (4.3)	79.0 (2.2)
7%	1601 (0.6)	5.6 (15.0)	35.7 (1.8)	0.959 (1.7)	48.9 (0.9)	86.0 (0.5)	82.7 (0.8)

B. Resistencia a Compresión (f_c)

Los resultados promedio y C.V. obtenidos para cada mezcla y edad de prueba se presentan en la Tabla V. Dichos valores muestran un incremento considerable en la resistencia a medida que el contenido de cemento aumenta. Se observa además que las dispersiones entre los datos tienden a reducirse a medida la edad de los especímenes aumenta, lo que pudiera implicar que las mezclas se vuelven más estables con el tiempo, presentando un comportamiento más uniforme. Además, resalta que la tendencia de todas las mezclas fue a incrementar su resistencia a compresión con la edad. No obstante, tal y como se observa en la Fig. 1, el ritmo al que éstas adquirieron resistencia con el tiempo es diferente y dependiente en gran medida del contenido de cemento de la mezcla. De esta forma, para la mezcla con 3% de cemento la resistencia a compresión a 7 días representó alrededor del 69% de la resistencia a 28 días. En el caso de la mezcla con 5% de cemento esta relación fue del 44%, mientras que para la mezcla con 7% de cemento fue del 36%.

Por otra parte, de la Fig. 1 también puede observarse que el curado influye notablemente en la resistencia a compresión, pues si bien a edades tempranas (7 días) el efecto parece no ser significativo, a medida que aumenta la edad, las muestras no curadas tienden a presentar resistencias superiores a las curadas. Este comportamiento fue comprobado estadísticamente a partir de una prueba de hipótesis y parece contradecir la teoría, pues se esperaría que al no brindar condiciones adecuadas para la hidratación del cemento, las resistencias obtenidas fueran menores.

TABLA V
RESULTADOS PROMEDIO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Mezcla	% de cemento en peso	Curado	fc - 7 días (kg/cm ²)	fc - 28 días (kg/cm ²)
M01	3	Sumergido	5.2 (8.2)	7.5 (3.9)
M02	3	No curado	5.4 (6.5)	8.7 (4.9)
M03	5	Sumergido	6.1 (12.1)	13.7 (3.5)
M04	7	Sumergido	6.9 (4.2)	19.4 (4.6)

*Los valores entre paréntesis indican el C.V.

Sin embargo, considerando que la cantidad de cemento que contienen las mezclas es relativamente baja (un máximo del 7%) y que los agregados utilizados poseen cantidades considerables de finos (alrededor del 40%), es muy probable que la pasta cementícea no sea capaz de cubrir todas las partículas de los agregados y brinde únicamente soporte general a la estructura de los especímenes. En este contexto, las características de los agregados podrían llegar a jugar un papel decisivo en la resistencia de los MRBC. Así, dado que la resistencia de los suelos depende en gran medida de las condiciones del fluido intersticial, el comportamiento observado podría explicarse tomando en cuenta que la condición más desfavorable para estos es la saturación de sus poros. En todo caso, es necesario llevar a cabo más experimentos para poder

confirmar esta hipótesis, además de evaluar los efectos del tipo de curado en mezclas con contenidos más altos de cemento, pues posiblemente las tendencias observadas en el presente estudio podrían cambiar.

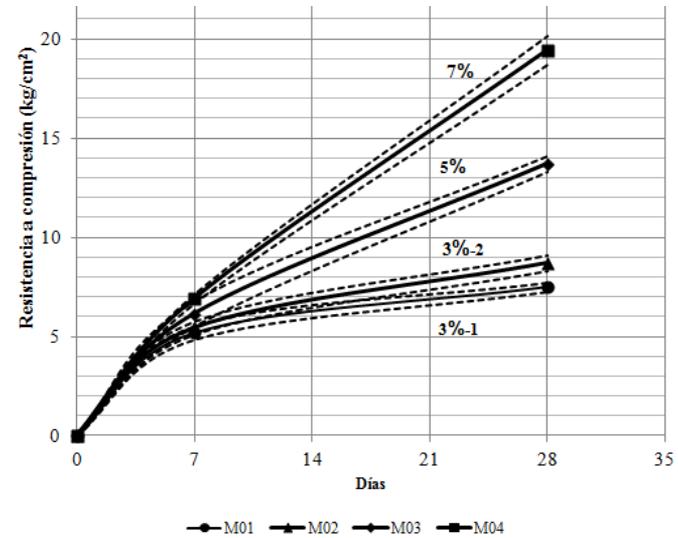


Fig. 1 Intervalos de confianza y variación de la resistencia a la compresión con respecto al tiempo. Nota: las líneas sólidas hacen referencia a los valores promedio de resistencia obtenidos y las líneas punteadas a los intervalos de confianza calculados.

C. Módulo de Elasticidad Estático y Módulo de Poisson

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla VI. El módulo de elasticidad (E_c) varió entre 6200-12200 kg/cm² a 7 días y entre 11000-19800 kg/cm² a 28 días. Dado que dichos valores son bastante bajos, se decidió no redondear los resultados, tal y como lo especifica la norma ASTM C 469. Cabe reconocer que los resultados presentados pudieron verse afectados tanto por el equipo como por la metodología seguida para su obtención. Así, las bajas resistencias de los MRBC (sobre todo a edades tempranas) generaban la necesidad de

realizar lecturas de deformación para valores bajos de carga, los cuales en algunos casos eran inferiores a la precisión del equipo.

TABLA VI

MÓDULO DE ELASTICIDAD Y MÓDULO DE POISSON A 7 DÍAS

% cemento en peso	% cemento volumen	7 días			28 días		
		f_c (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ν	f_c (kg/cm ²)	E (kg/cm ²)	ν
3	2.2	4.6	6881	0.04	7.6	11236	0.17
		5.7	6214	0.08	7.4	13557	0.17
5	3.5	6.8	10121	0.02	13.2	18335	0.14
		6.3	8581	0.13	14.3	16219	0.14
7	5.1	7.4	12220	0.07	18.6	16457	0.09
		7.3	11591	0.07	19.6	19743	0.11

A pesar de esto, los valores presentados muestran un comportamiento acorde al esperado. Se puede observar como éstos aumentan considerablemente con la edad y el contenido de cemento. Por otra parte, los valores de módulo de Poisson (ν) a 7 días, no se consideran confiables, pues dadas las bajas cargas utilizadas a penas se pudo observar deformaciones transversales. En cambio, los resultados a 28 días describen de muy buena manera el comportamiento observado del material. Así, el módulo de Poisson tiende a reducirse a con el aumento en el contenido de cemento y la edad.

Dado que la realización de ensayos de módulo de elasticidad a MRBC no es una práctica común, es usual la utilización de correlaciones para la determinación del módulo de elasticidad a partir de la resistencia a compresión. La bibliografía consultada presenta diversas ecuaciones que relacionan ambas propiedades, entre ellas destacan las expresiones sugeridas en el ACI 318 [3] (para concreto con pesos volumétricos entre 1440 y 2560 kg/m³) y por el IMCYC [6] (para MRBC con pesos volumétricos entre 1750 y 1950 kg/m³):

$$E_c = w_c^{1.5} 0.14 \sqrt{f_c} \quad (\text{Ec. 1})$$

$$E_c = 10235 \sqrt{f_c} \quad (\text{Ec. 2})$$

En donde E_c se encuentra en kg/cm²; f_c , se encuentra en kg/cm² y w_c es el peso volumétrico del material en kg/m³. Para comparar los resultados brindados por estas ecuaciones se desarrolló la Fig. 2. Ésta presenta los valores de módulo de elasticidad obtenidos en el presente estudio, junto con los calculados a partir de sus correspondientes resistencias a compresión y peso volumétrico. Como se puede observar, los valores obtenidos se encuentran muy por debajo de los calculados por medio de las correlaciones existentes. Cabe resaltar que los MRBC ensayados en el estudio poseían pesos volumétricos (1583 – 1683 kg/m³) inferiores a los límites establecidos por el IMCYC, lo que podría explicar dicha divergencia. En todo caso, debido a lo anterior no se recomienda el uso de estas ecuaciones (por lo menos para la estimación del módulo de elasticidad de MRBC elaborados con materiales similares a los estudiados) pues esto puede conducir a una sobreestimación de los valores de módulo de elasticidad de los especímenes.

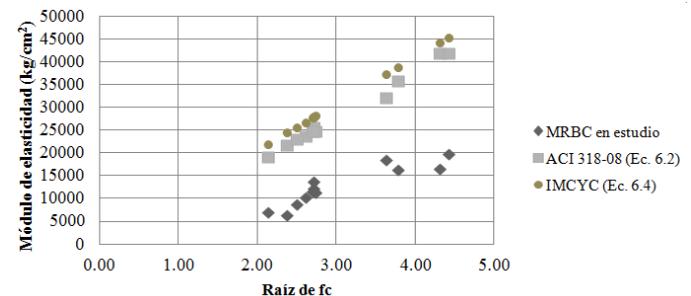


Fig. 2 Correlaciones de módulo de elasticidad con resistencia a la compresión sugeridas y los obtenidos en el presente estudio.

Al analizar únicamente los datos del presente estudio y a partir de una regresión potencial, se logró determinar la función de mejor ajuste de estos, siendo:

$$E_c = 2597 f_c^{0.696} \quad (\text{Ec. 3})$$

La cual posee un coeficiente de correlación igual a 0.896. A pesar de que dicho valor podría indicar que existe una buena correlación entre los datos investigados, ésta no se considera confiable debido al bajo número de ensayos realizados y a que los valores no se encuentran adecuadamente distribuidos. Así, tal y como puede verse en la Fig. 3, existe una brecha significativa entre los datos.

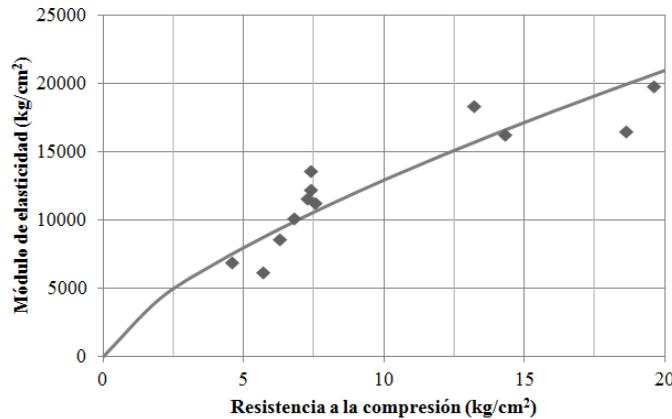


Fig. 3 Correlación del módulo de elasticidad estático contra la raíz de la resistencia a compresión.

D. Resistencia Cortante

Los resultados de las pruebas triaxiales no consolidadas – no drenadas realizadas, se presentan en la Tabla VII, en donde los coeficientes de variación se presentan entre paréntesis. En general, al comparar los valores de cohesión obtenidos en todas las mezclas a 7 días y en las mezclas con 3% de cemento a 28 días (cuyas resistencias a compresión se

encuentran entre 4.4-9.1 kg/cm²) con los presentados por Anastas, García y Pas [4] para arena limosa compactada (0.2-1.4 kg/cm²) se puede observar que estos son muy similares. En cambio, la cohesión a 28 días de las mezclas con 5 y 7% de cemento (cuyos valores de resistencia a compresión varían entre 13.0-21.0 kg/cm²) resultaron ser muy superiores. Por otra parte, los valores de ángulo de fricción obtenidos en el presente estudio están comprendidos dentro del rango obtenido por Anastas, García y Pas (35-49.5°). Se puede apreciar por tanto, que tal y como establece el ACI 229R-99 [2], los MRBC con resistencias a compresión entre 3-7 kg/cm² ofrecen resistencias a cortante similares a los rellenos bien compactados.

A pesar que los valores de C.V. de los resultados obtenidos son relativamente altos (sobre todo en la cohesión) al graficar la ley de resistencia de Mohr-Coulomb para las pruebas de una misma mezcla, ver Fig. 4, se puede observar que dicha dispersión no es tan alta, sobre todo considerando el tipo de material investigado. No obstante el análisis de la influencia del contenido de cemento, curado y el tiempo se realizó por separado y se presenta en apartados posteriores.

TABLA VII

RESULTADOS PROMEDIO OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS TRIAXIALES REALIZADAS A LAS MEZCLAS DE MRBC.

Mezcla	% de cemento en peso	7 días		28 días	
		Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)
M01	3	1.61 (18.1)	34.4 (13.1)	1.58 (35.1)	39.3 (16.4)
M02	3	0.87 (14.2)	41.6 (6.3)	1.50 (23.9)	42.7 (11.1)
M03	5	1.68 (33.8)	35.3 (15.7)	2.21 (21.4)	41.6 (11.7)
M04	7	1.10 (27.7)	41.7 (10.6)	3.30 (22.6)	39.4 (15.8)

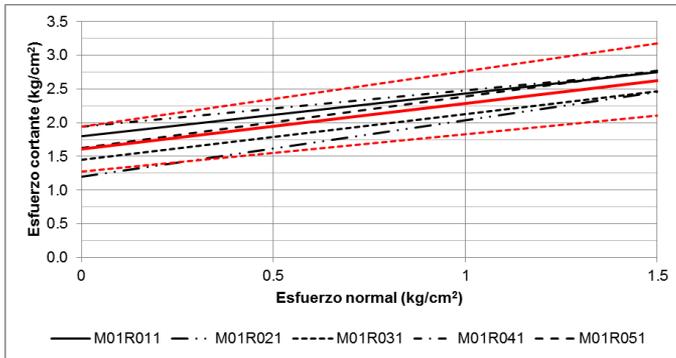


Fig. 4 Gráfica de ley de resistencia Mohr-Coulomb para mezcla con 3% de cemento a un día, la línea central continua indica los valores promedio, mientras que las líneas externas con guiones sencillos los intervalos de confianza calculados.

1) *Cohesión*. Las Fig. 5 y 6 presentan gráficas de dispersión para los valores de cohesión obtenidos bajo el mismo tipo de curado y los diferentes contenidos de cemento trabajados: en ellas, la línea sólida representa la tendencia de los valores promedio y las líneas punteadas los intervalos de confianza. Puede observarse que a 28 días la cohesión de los especímenes aumenta a medida que se incrementa el contenido de cemento, lo cual es lógico dado que ésta es una medida de la cementación del suelo. En cambio, a 7 días los valores de cohesión presentaron una tendencia inesperada al disminuir con el aumento en el contenido de cemento.

Sin embargo, tomando en cuenta la variación del comportamiento del cemento a lo largo del tiempo, los resultados parecen indicar que a edades tempranas el aporte a la cohesión de la pasta cementícea (la cual aún no ha logrado desarrollar adecuadamente su resistencia) no es tan relevante, por lo cual los MRBC tienden a comportarse más como suelos (y de ahí su aparente contradicción con la teoría). En adición, a

medida que el tiempo transcurre dicha pasta comienza a jugar un papel cada vez más relevante en su comportamiento.

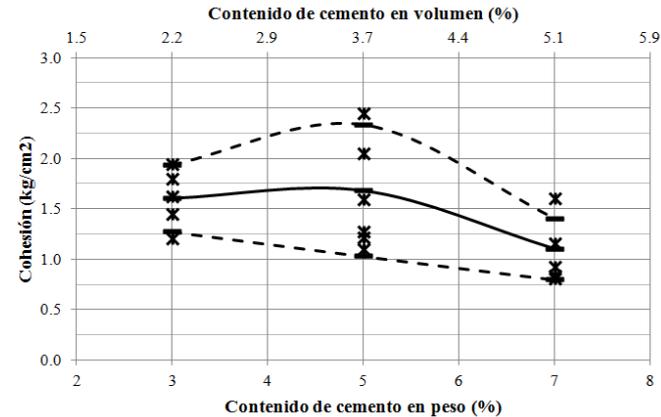


Fig. 5 Dispersión de los valores de cohesión obtenidos a 7 días, según el contenido de cemento.

Las afirmaciones anteriores son respaldadas por las observaciones llevadas a cabo durante las pruebas triaxiales. En ellas, se pudo advertir cómo a edades tempranas las probetas ensayadas presentaban un comportamiento más dúctil que aquellas ensayadas edades posteriores, un ejemplo de dicha conducta se presenta en la Fig. 7. En ella se aprecia que a 7 días, las probetas alcanzaban niveles altos de deformación unitaria antes de obtener su resistencia máxima (en muchos casos se debió recurrir al criterio del 15% de deformación unitaria para definir dicho valor). En cambio, las probetas ensayadas a 28 días presentaban un comportamiento más frágil, obteniéndose resistencias superiores pero a valores de deformación unitaria bajos (menores al 5%).

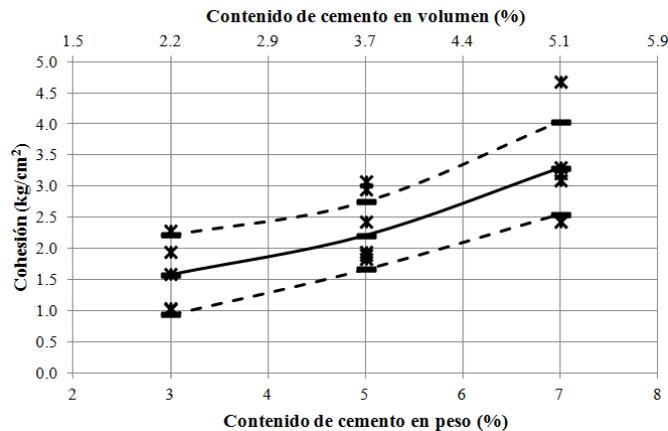


Fig. 6 Dispersión de los valores de cohesión obtenidos a 28 días, según el contenido de cemento.

Cabe mencionar que para especímenes con la misma edad de prueba, aquellos con menor contenido de cemento presentaron un comportamiento más dúctil. De modo que a medida aumenta el contenido de cemento, también lo hace la fragilidad de los especímenes. Por otra parte, al analizar uno a uno los resultados de cohesión obtenidos a 7 días (para cada mezcla y revoltura) y compararlos con su correspondiente valor a 28 días pudo observarse que la cohesión tiende a incrementarse considerablemente con el tiempo. Sin embargo dicho incremento no se lleva a cabo de la misma manera para todas las mezclas. De forma similar a lo sucedido con la resistencia a compresión, la tasa de incremento de la cohesión es mayor en aquellas mezclas con contenidos de cemento superiores. Así, los valores de cohesión de la mezcla M02 a 7 días representan entre el 47 y 65% de los observados a 28 días, mientras que para la M03 son entre el 37 y 86%. En cambio para la mezcla M04 los valores a 7 días representan solamente entre el 25 y el 41% de la resistencia a 28 días.

En cuanto a los efectos del tipo de curado en la cohesión, los valores obtenidos para ambas mezclas con 3% de cemento, no presentaron tendencia alguna, a diferencia de lo observado en los resultados de la resistencia a compresión. Sin embargo, es de mencionar que tanto los especímenes curados como los no curados permanecieron dentro de los tubos de PVC que se utilizaron como moldes hasta el día de ensayo, teniendo por tanto un área superficial expuesta al agua (o al aire en el caso de los curados en bolsa) mucho menor. Esto provocó que los valores de contenido de humedad de las muestras curadas fueran muy similares al de las no curadas, en ambos casos el contenido varió entre el 35-40%. Debido a lo anterior no fue posible generar una verdadera diferencia entre las dos condiciones de curado, por lo cual no se pudo observar el mismo fenómeno que en los especímenes ensayados a compresión.

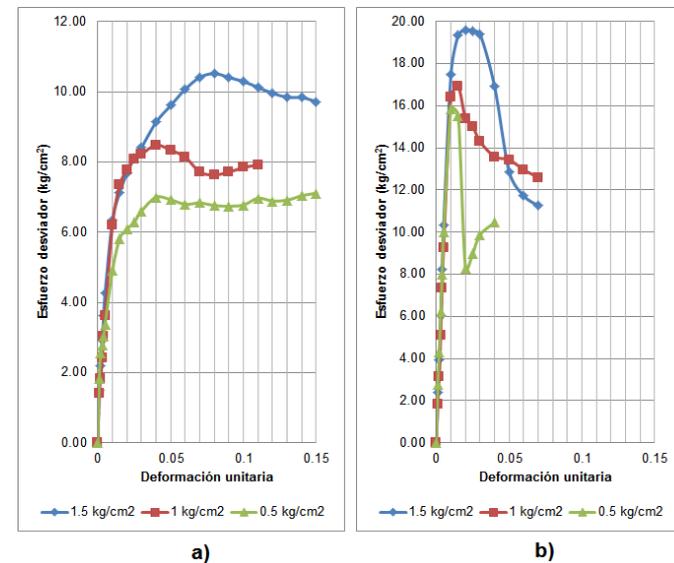


Fig. 7 Comportamiento de probetas de la mezcla M04R02 utilizadas en pruebas triaxiales, a) 7 días y b) 28 días.

Al analizar la relación entre la cohesión y la resistencia a compresión de las mezclas solo se logró apreciar una leve tendencia en los resultados a 28 días, ver Fig. 8. No obstante, el coeficiente de correlación obtenido fue de apenas 0.799, por lo que se necesita un mayor número de ensayos para poder obtener una regresión más significativa.

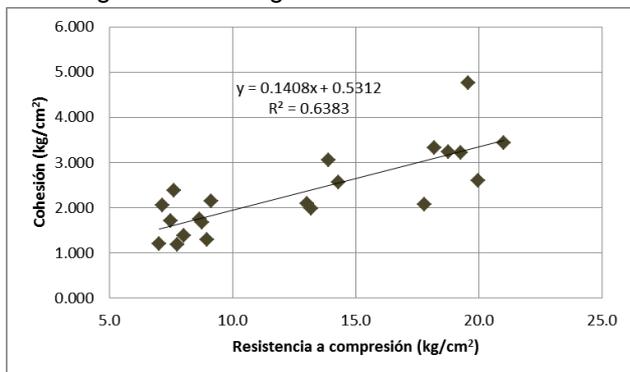


Fig. 8 Relación entre cohesión y resistencia a compresión a 28 días.

2) *Ángulo de fricción.* Los valores promedio del ángulo de fricción presentaron un comportamiento inesperado a los 7 días, pues sus valores aumentaron conforme los especímenes poseían un contenido de cemento mayor. Esto a pesar de ser una propiedad que primordialmente depende del tipo de partículas que componen la muestra. Sin embargo, a 28 días los valores de ángulo de fricción (si bien con algunas dispersiones) no varían mucho para las distintas mezclas, ni siguen una tendencia particular que pueda ser estrictamente relacionada con el contenido de cemento. De modo que las tendencias observadas a 7 días, se podrían encontrar relacionadas con variaciones propias de los suelos. Por otra parte, al evaluar uno a uno los resultados obtenidos a 7 y 28 días, se determinó que el ángulo de fricción no presenta una tendencia definida con el tiempo.

Cabe mencionar, que dado que la inclusión del cemento modifica considerablemente la estructura natural del suelo, los valores del ángulo de fricción no serían totalmente independientes de los contenidos de cemento, lo cual explicaría que los valores obtenidos sean tan altos (respecto al suelo natural) y el hecho que estos no se vean modificados en el tiempo (pues no dependen de la resistencia del cemento, sino más bien de los cambios en la estructura realizados al momento de la revoltura).

E. Comportamiento Esfuerzo – Deformación Uniaxial

Los ensayos de consolidación unidimensional se llevaron a cabo en especímenes con 1 y 28 días de edad. Todas las muestras de MRBC ensayadas a 1 día exhibieron un comportamiento similar al de una arena limosa, pues presentaban deformaciones considerables que variaban con el tiempo, aunque con un período de estabilización relativamente rápido. Por otra parte, en las muestras a 28 días las deformaciones obtenidas fueron bastante bajas, generándose la mayor parte de éstas inmediatamente después de aplicada la carga. En algunos casos, no se observó variación en la deformación con el tiempo. No obstante, dicho comportamiento no fue observado para todos los procesos de carga, variando sensiblemente en el primero.

El contraste entre el comportamiento de las muestras a 1 y 28 días para la mezcla M01 se muestra en la Fig. 9 y 10, en la primera se observa como para la muestra de 1 día la deformación varía en el tiempo; mientras que en la segunda, la muestra de 28 días se deforma casi instantáneamente con la aplicación de la carga.

Los valores de índice de compresión (C_c) y recompresión (C_r) obtenidos, se presentan en la Tabla VIII. Nótese que estos

son muy pequeños dado que ambos son indicadores del potencial de deformación de la muestra, reflejan que las mezclas ensayadas son muy poco susceptibles a sufrir asentamientos ante la aplicación de cargas. Es importante resaltar que las mezclas con 3 y 5% de cemento presentaron mayores valores de C_c a 28 días que a 1 día. Esto parece contradictorio pues a medida que el material gana resistencia debería ser menos comprensible.

Dicha conducta se podría explicar en base al comportamiento esfuerzo – deformación observada en los ensayos triaxiales, pues los MRBC si bien incrementan su resistencia con el tiempo, se vuelven a su vez más frágiles. Así, en las pruebas a 28 días de la M01 y M03 (con comportamiento atípico), se notó que ante cargas bajas los especímenes presentaron desplazamientos muy pequeños, sin embargo para las presiones de 200 y 400 kPa experimentaban una deformación abrupta. Dada la fragilidad del material, probablemente las presiones impuestas fueron lo suficientemente grandes como para producir que la estructura principal (generada por la pasta cementícea) fallara y requiriera de un reacomodo en sus partículas, generando deformaciones mucho mayores y por ende la obtención de un C_c mayor.

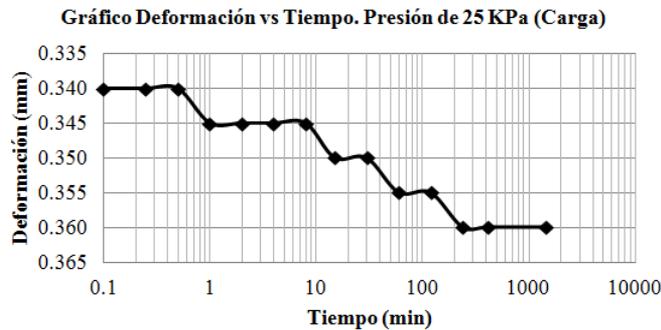


Fig. 10 Gráficas deformación contra logaritmo del tiempo para primera carga en mezcla M01 a 1 día.

TABLA VIII
VALORES OBTENIDOS DE C_c Y C_r POR MUESTRA

Mezcla	% de cemento	Edad	C_c	C_r
M01	3	1 día	0.017	0.002
		28 días	0.090	0.009
M03	5	1 día	0.008	0.002
		28 días	0.107	0.004
M04	7	1 día	0.023	0.003
		28 días	0.013	0.006

Este comportamiento pudo no haber sido observado en la mezcla M04 a 28 días, pues dado que esta posee un mayor contenido de cemento y por consiguiente una mayor resistencia, probablemente requeriría de un esfuerzo mayor a 400 kPa para presentar el cambio abrupto antes mencionado. De ser así, el tiempo sería una variable influyente en la comprensibilidad de las mezclas pues a medida el tiempo aumenta, y con éste la resistencia y la fragilidad, los especímenes pueden experimentar cambios bruscos en su estructura interna y su relación de vacíos bajo la acción de cargas lo suficientemente altas.

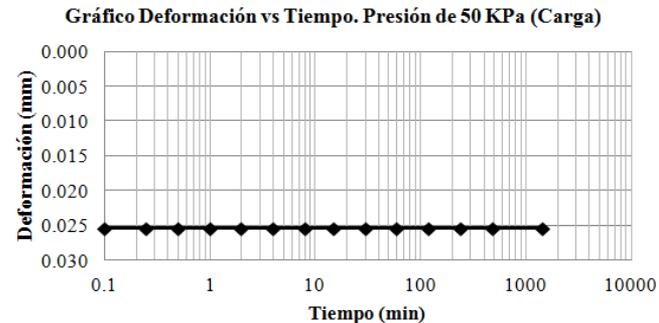


Fig. 11 Gráficas deformación contra logaritmo del tiempo para primera carga en mezcla M01 a 28 días.

De cualquier manera, se considera necesaria la realización de una mayor cantidad de ensayos para poder validar los resultados y comportamientos antes presentados.

CONCLUSIONES

Las mezclas estudiadas tienden a aumentar su resistencia a compresión con la edad, siendo la tasa de incremento de ésta diferente en función de los contenidos de cemento presentes en las mismas.

Los especímenes no curados presentan resistencias a compresión mayores a los curados según la norma ASTM C 191/C 191M-02. Se cree que dado los bajos contenidos de cemento utilizados, la pasta cementícea no es capaz de cubrir todas las partículas de los agregados, por lo que brinda únicamente soporte general a la estructura de los especímenes. En este aspecto, las características de los agregados juegan un papel decisivo en el comportamiento de los MRBC y la condición de saturación de poros, generada por el sumergimiento de los elementos en agua, se convierte por tanto en la situación más desfavorable para la prueba. Sin embargo, debido a que la influencia de este parámetro solo fue evaluada para mezclas con un bajo contenido de cemento, se reconoce que es necesario llevar a cabo nuevos estudios con proporciones mayores y tipos de cemento diferentes.

El comportamiento de los especímenes estudiados en las pruebas triaxiales varía en función del tiempo. A edades tempranas las muestras presentan un comportamiento dúctil, en cambio, a edades mayores las muestras presentan un comportamiento muy frágil. Dicha conducta se vuelve más marcada a medida aumenta el contenido de cemento. Debido al carácter tan frágil de las muestras, se recomienda que para futuros ensayos se realicen mediciones de carga a intervalos

menores a los establecidos en la norma ASTM D 2850-95. Los resultados indican que las propiedades geotécnicas de los MRBC estudiados con resistencias a compresión entre 4.4-9.1 kg/cm² son similares a las de un relleno compactado.

Dado el comportamiento esfuerzo-deformación exhibido por los especímenes, se reconoce que el tipo de pruebas triaxiales realizadas no reflejan adecuadamente la conducta real que los MRBC pudieran tener en servicio, pues estas deberían ser desarrolladas en términos de esfuerzos efectivos. Por lo cual se sugiere para próximos estudios realizar pruebas en condición consolidada-drenada.

No se logró desarrollar una correlación confiable entre la resistencia a compresión y la cohesión de los MRBC. No obstante se reconoce una tendencia entre los datos, por lo que se recomienda desarrollar una mayor cantidad de ensayos para definir la regresión de mejor manera.

Existe un cambio en el comportamiento esfuerzo-deformación de los MRBC con la edad. Las muestras ensayadas a 1 día exhiben un comportamiento similar al de una arena limosa, aunque con un periodo de estabilización relativamente corto. En cambio, las muestras ensayadas a 28 días exhiben un comportamiento más similar al concreto, presentando deformaciones bajas que se generaban casi en su totalidad inmediatamente después de aplicada la carga. Se considera necesario en este campo evaluar el comportamiento de MRBC desarrollados a partir de agregados con comportamiento esfuerzo-deformación diferente al utilizado, además de evaluar los posibles efectos del agua. Para esto último se recomienda realizar pruebas de consolidación dobles.

Los MRBC estudiados son materiales muy poco compresibles incluso a edades tempranas.

Dadas las bajas deformaciones horizontales que experimentaron los especímenes en los ensayos a 7 días y la precisión del equipo utilizado, los valores de módulo de Poisson obtenidos no se consideran confiables. Por otra parte, a 28 días el módulo de Poisson de los MRBC tiende a reducirse a medida que la resistencia a compresión, aumenta. Para futuras investigaciones se sugiere el cálculo de estos parámetros a partir de pruebas desarrolladas en equipo más preciso al utilizado en el presente estudio.

A pesar que se logró determinar una regresión entre el módulo de elasticidad estático y la resistencia a compresión de los MRBC con una correlación relativamente alta, el número de pruebas realizadas no es suficiente para considerarla confiable. Debido a esto se recomienda desarrollar más ensayos, pudiendo servir los resultados presentados para generar una base de datos. Además, se considera importante realizar investigaciones acerca de este tema con MRBC elaborados a partir de diferentes tipos de cemento y suelo.

REFERENCIAS

- [1] ACI 116R-00 *Cement and Concrete Terminology* Reapproved 2005, 2005.
- [2] ACI 229R-99 *Controlled Low-Strength Materials* Reapproved 2005, 2005.
- [3] ACI 318-08 *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, 2008.
- [4] Anastas, F.E., R.J.A. García y C.L. Pas *Capacidad de carga admisible para suelos compactados*. Trabajo de graduación para optar al grado de ingeniero civil en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", San Salvador, El Salvador, 1996.
- [5] Du, L., K.J. Folliard, C. Halmen, D. Leshchinsky, D. Trejo y S. Sabol *Development of a Recommended Practice for Use of Controlled*

Low-Strength Materials in Highway Construction. NCHRP Report 597. Washington D.C., Estados Unidos de Norteamérica, 2008.

[6] Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (IMCYC) (julio 2012) [Online]. Disponible en: <http://www.imcyc.com/revista/2000/abril2000/rellenofluido.htm>.

[7] Instituto Salvadoreño del Cemento y el Concreto. Curso: *Aplicaciones y generalidades de materiales de resistencia baja controlada (lodocreto)*. Antiguo Cuscatlán, El Salvador, 2012.

BIOGRAFÍAS

David Barba nació en San Salvador, El Salvador, el 8 de junio de 1989. Se graduó del Colegio Externado San José en San Salvador y estudió en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Ronald Escobar nació en Ilobasco, El Salvador, el 25 de febrero de 1982. Se graduó del Instituto Nacional de Ilobasco en Ilobasco y estudió en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Alexandra Urbina nació en San Salvador, El Salvador, el 27 de marzo de 1989. Se graduó del Colegio La Sagrada Familia en San Salvador y estudió en la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas".

Patricia Méndez de Hasbun nació en Los Angeles, California, E.E.U.U., el 4 de abril de 1959. Se graduó de la Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas", UCA, y realizó dos años de cursos de Doctorado en la Escuela Técnica de Ingenieros Industriales, de la Universidad Politécnica de Madrid, España. Ha trabajado en la UCA como catedrática e investigadora.