

EFEECTO DE LA HUMEDAD DE COMPACTACIÓN EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE BTC

EFFECT OF COMPACTION HUMIDITY ON BTC MECHANICAL PROPERTIES

Autores: Valentín J. Morales Domínguez

Rafael Alavez Ramírez

Margarito Ortiz Guzmán

Institución: Instituto Politécnico Nacional, Oaxaca, México

Correo electrónico: valentinmd@yahoo.com.mx

RESUMEN

Con la finalidad de evaluar los efectos que tiene la humedad de compactación en las propiedades mecánicas de Bloques de Tierra Compactada elaborados en una máquina compactadora manual, tres suelos, obtenidos de la mezcla en diferentes porcentajes de un suelo granular y un suelo más fino, se emplearon para elaborar series de Bloques de Tierra Compactada (BTC) para cinco porcentajes de humedad por cada tipo de suelo, en una máquina compactadora manual. También estos tres suelos se estabilizaron con cemento (10% en peso) y se elaboraron series de BTC para cinco porcentajes de humedad. Los BTC de suelo sin cemento se sometieron a un proceso de secado inicial al medio ambiente y posteriormente se introdujeron en un horno eléctrico a una temperatura de 100 a 110 °C para su secado hasta masa constante y a continuación se les determinó sus propiedades mecánicas mediante ensayos a flexión y compresión, en tanto que a los BTC estabilizados con el 10% de cemento, se sometieron a un proceso de curado durante 28 días y posteriormente se secaron hasta masa constante para proceder a sus ensayos a flexión y compresión hasta su falla total. Los resultados obtenidos muestran que en los suelos sin cemento la resistencia a la flexión se incrementó con el contenido de agua empleado en la compactación de los BTC, en tanto

que en los suelos estabilizados con cemento el comportamiento fue opuesto. En lo que se refiere a la resistencia a la compresión axial, los mejores resultados se obtuvieron en la mezcla 60-40 (suelo-arena) estabilizada con el 10% de cemento.

Palabras clave: BTC, Prensa manual, Contenido de humedad, Propiedades mecánicas, Suelo.

ABSTRACT

In order to evaluate the effects of compaction moisture on the mechanical properties of Compacted Earth Blocks made in a manual compactor machine, three soils, obtained from the mixture in different percentages of a granular soil and a finer soil, they were used to elaborate series of Compacted Earth Blocks (BTC) for five percentages of moisture for each type of soil, in a manual compacting machine. These three soils were also stabilized with cement (10% by weight) and BTC series were prepared for five moisture percentages. The BTC of soil without cement was subjected to an initial drying process to the environment and then introduced in an electric oven at a temperature of 100 to 110° C for drying to constant mass and then their mechanical properties were determined by tests to flexion and compression, while the BTCs stabilized with 10% cement, were subjected to a curing process for 28 days and then dried to constant mass to proceed to their tests of flexion and compression until their total failure. The results obtained show that in cementless soils the resistance to bending increased with the water content used in the compaction of the BTC, while in the soils stabilized with cement, the behavior was opposite. Regarding the resistance to axial compression, the best results were obtained in the mixture 60-40 (soil-sand) stabilized with 10% cement.

Keywords: BTC, Manual press, Moisture content, Mechanical properties, Soil.

INTRODUCCIÓN

Los materiales de construcción utilizados no han correspondido siempre a la mejor opción posible, debido a que en la mayoría de los casos se han edificado viviendas o conjuntos habitacionales, cuyos materiales de construcción no coinciden con las características biogeografías del lugar y con la disponibilidad de recursos locales y regionales que

pudiesen ser utilizados a menor costo y con mejores resultados para el confort humano, para tal efecto es posible buscar la integración de las tecnologías producto de los avances actuales y las tecnologías tradicionales para propiciar la conjunción de lo moderno con lo tradicional y crear un espacio adecuado al hombre, en reencuentro con el medio natural (Chávez, 1985).

Los procesos constructivos de viviendas originan actividades con impactos negativos hacia el medio ambiente, tanto por los materiales que se emplean como por los procesos mismos. Desde épocas remotas, la tierra ha sido empleada como material de construcción por ser económica y abundante (Jiménez y Cañas, 2007), (Venkatarama y Jagadish, 1987). Los bloques de tierra han sido usados para la construcción de muros en viviendas y su proceso de fabricación es amigable con el medio ambiente (Morales et al., 2007); en la actualidad, se busca emplear materiales que impacten menos al ambiente, por lo que hay un nuevo interés en el uso de la tierra, porque los materiales térreos requieren de baja energía para su fabricación (Morel, et al., 2001).

Los bloques de tierra han sido usados en áreas rurales y desiertos, en México se le da el nombre de adobe, el cual es un material regional, empleado para la construcción de muros en viviendas y aunque es un material noble y amigable con el medio ambiente, su uso ha ido decreciendo, debido a su mal comportamiento ante sismos e inundaciones, por lo que los reglamentos de construcción no le confieren valor estructural alguno (Morales et al., 2007).

El uso de la tierra como material de construcción sigue siendo importante, por ejemplo, según el INEGI en su censo 2010, en la república mexicana existen más de dos millones de viviendas construidas con muros de adobe, asentadas mayormente en zonas rurales y en menor medida en zonas residenciales.

La construcción con adobe es una de las más antiguas tecnologías de construcción conocida, aun cuando su uso ha cambiado significativamente en las construcciones urbanas con el desarrollo de modernas construcciones de tabiques y cemento Portland, el adobe es todavía un material de construcción indispensable en zonas rurales, debido a problemas económicos y financieros. El adobe ha sido uno de los materiales de construcción preferidos por su fácil adquisición, casi no requiere energía para su

producción, es fácil de elaborar, de bajo costo, puede ser reciclado al final de su vida útil y no daña al medio ambiente. La forma densa de las construcciones de adobe las hace confortables tanto durante la época de calor como de frío (Degirmenci et al., 2005).

El inconveniente de las construcciones de tierra es la necesidad de mantenimiento continuo para mejorar su resistencia al agua y aumentar su durabilidad, muchas fallas en estas construcciones se han reportado después de inundaciones estacionales en Argelia (Kenai, et al., 2006).

El suelo puede ser estabilizado químicamente con el uso de aditivos y por una compactación manual, compactación mecánica o con fibras naturales, con el desarrollo de la albañilería y el concreto reforzado, las construcciones basadas en el suelo se han diseñado para personas pobres y por lo tanto su baja calidad, debida principalmente a sus problemas de durabilidad y falta de resistencia al agua y a la erosión (Bahar et al., 2004).

Se han hecho estudios para determinar las características de los suelos que incidan en una mejora de las características de los bloques para construcción a base de materiales térreos, estabilizándolos por varios métodos sin considerar la variabilidad en la humedad de compactación, por lo que el objetivo del presente trabajo de investigación, es evaluar los efectos que tienen diferentes humedades de compactación en las propiedades mecánicas de BTC elaborados con una misma energía de compactación, proporcionada por una máquina compactadora manual.

El block de tierra compactada (BTC) surge como una alternativa para retomar el uso del suelo como material de construcción, debido a que presenta mejores características mecánicas, al mejorar el proceso de fabricación y propiedades estructurales proporcionadas por el proceso de compactación (Khedari et al., 2005), (Ghavami et al., 1999), (Youngquist et al., 1996), (Walter et al., 1995), (Reddy, 1998), pero requiere de estudios y experimentaciones para mejorar su calidad.

Se han hecho estudios para determinar las características de los suelos que incidan en una mejora de las características de los bloques para construcción a base de materiales térreos, estabilizándolos tanto mecánicamente (mediante mejoras en las máquinas compactadoras) como químicamente (mediante la adición de cal y principalmente

cemento portland).

El método de estabilización por compactación busca mejorar las propiedades mecánicas del suelo empleando equipos mecánicos que involucran su disminución de volumen. La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de su resistencia y la disminución de su capacidad de deformación, mediante técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco y disminuyan sus vacíos.

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaje en cada caso, los materiales puramente friccionantes, como la arena, se compactan eficientemente por métodos vibratorios, en tanto que en los suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso (Juárez y Rico, 2001).

Juárez y Rico (2001) mencionan que la eficiencia de cualquier equipo de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno, se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan en el laboratorio la compactación que se pueda lograr en el campo con el equipo disponible. De entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son los más importantes: el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica y energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen empleada en dicho proceso, en el caso de los BTC, la energía depende directamente de la capacidad de los diferentes equipos construidos para tal fin, en nuestro caso se empleó una máquina compactadora manual, la cual no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento y es fácil de transportar y usar en zonas rurales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se caracterizaron dos tipos de materiales, un suelo con característica finas, propicio para la elaboración de Bloques de Tierra Compactada (BTC) y otro de características granulares (arena), el primero procede de un banco cercano al lugar donde se desarrolló la presente investigación (CIIDIR IPN unidad Oaxaca), el cual se ubica dentro del terreno del Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca (ITVO), y otro suelo arenoso, el cual se

encontraba almacenado en el CIIDIR unidad Oaxaca y procede del río de Santa María Tinú, en el distrito de Nochixtlán, Oaxaca.

El suelo transportado al CIIDIR unidad Oaxaca, se secó, disgregó, cribó por una malla de 6 mm de abertura y se cuarteó para tomar porciones de suelo representativas que se emplearon en la elaboración de dos mezclas, la primera en una proporción de 80-20% en peso de suelo y arena y otra 60-40% de los materiales mencionados.

Tanto el suelo como las dos mezclas se caracterizaron mediante sus respectivos análisis granulométricos, pesos volumétricos secos sueltos, densidad y límites de atterberg, a la arena se le realizó su análisis granulométrico y se determinó su densidad y peso volumétrico seco suelto, en la figura 1 se presenta la granulometría de los suelos y las mezclas mencionadas.

Las densidades, pesos volumétricos secos sueltos y límites de atterberg se presentan en la tabla 1.

Los suelos empleados para la experimentación fueron: Suelo procedente del ITVO, mezclas del suelo del ITVO y arena de Santa María Tinú en proporciones en peso de 80-20% y 60-40%, haciendo un total de tres.

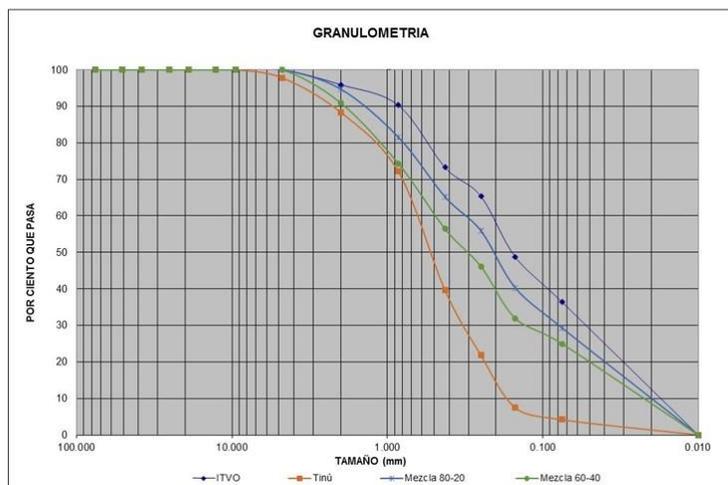


Figura 1. Curvas granulométricas del suelo del ITVO, la arena del río de Santa María Tinú y las mezclas empleadas.

Se pesaron 200 kg de cada uno de los tres suelos antes mencionados y con ellos se elaboraron series de tres BTC de la siguiente manera:

El suelo se extendió sobre una superficie de concreto con acabado pulido y posteriormente se le agregó agua para obtener una humedad inicial baja (que varió del 10 al 12% en los tres suelos sin cemento y del 8 al 12% en los tres suelos con cemento (material del ITVO, mezcla 80-20 y mezcla 60-40), con el agua adicionada el suelo se mezcló traspaleándolo de un lugar a otro hasta que se observó una humedad uniforme.

Material	densidad	Peso Volumétrico Seco Suelto (kg/m ³)	Límite líquido	Índice plástico	Contracción lineal
Suelo	2.69	1154	33	10	5.1
Arena	2.67	1453			
Mezcla 80-20	2.68	1194	32	9	4.65
Mezcla 60-40	2.67	1211	29	9	4.04

Tabla 1. Características de los materiales empleados.

Posteriormente se elaboraron los BTC agregando el suelo con la humedad inicial al molde y compactándolo mediante el sistema de palanca con el que cuenta la máquina compactadora manual, haciéndolo durante varios tanteos hasta que se logró elaborar el BTC con el mayor esfuerzo de la persona que aplicó la carga de compactación, figura 2.



Figura 2. Compactación inicial del BTC.

Se extrajo el BTC del molde y se pesó en una báscula de plataforma con capacidad de 20 kg y aproximación de 1 gramo, se registró el peso y se pesaron otros dos tantos de suelo, con el mismo peso del adobe elaborado, con las dos porciones de suelo se

elaboraron otros dos BTC corroborando el esfuerzo realizado para la elaboración de los bloques, se tomaron sus dimensiones (largo, ancho y espesor), y una muestra para determinar su humedad.

El procedimiento anterior se repitió nuevamente, pero como al suelo se le agregó un 2% de humedad. Este procedimiento se repitió otras tres veces más, para hacer series de tres BTCs con cinco diferentes humedades de compactación. El procedimiento mencionado se realizó para los otros dos suelos y los tres más estabilizados con el 10% de cemento en peso, en total se elaboraron 90 BTCs.



Figura 3. Elaboración de series de BTC.

Las muestras de humedad se secaron en un horno eléctrico hasta masa constante y se les determinó su humedad. También se les determinó su peso volumétrico seco.

Los BTC elaborados con suelos sin cemento se secaron a temperatura ambiente durante cinco días para que perdieran humedad y posteriormente se introdujeron en un horno eléctrico a una temperatura de 105 ± 5 °C hasta su masa constante, en el caso de las probetas de BTCs elaboradas con cemento portland, se curaron en un ambiente húmedo durante 28 días y posteriormente se sometieron a un proceso de secado hasta masa constante, en un horno eléctrico a una temperatura de 105 ± 5 °C. Secas las probetas, se les realizaron ensayos de flexión y compresión axial.

RESULTADO Y DISCUSIÓN

En la tabla 2 y 3 se muestran los resultados de los pesos volumétricos secos y % de

humedad de compactación obtenidos en la máquina compactadora manual para cada uno de los tres suelos sin estabilizar y los tres suelos estabilizados con cemento portland, y con los cinco niveles de humedad por mezcla.

Suelo		Mezcla 80-20		Mezcla 60-40	
%w	PVS kg/m ³	%w	PVS kg/m ³	%w	PVS kg/m ³
11.1	1787	10.4	1765	10.3	1740
13.1	1795	11.8	1782	12.1	1756
15.1	1818	13.8	1786	13.9	1724
16.8	1825	15.7	1802	16.6	1730
19.6	1816	17.8	1816	18.8	1754

Tabla 2. Pesos Volumétricos secos y humedad de compactación en suelos sin cemento.

Suelo		Mezcla 80-20		Mezcla 60-40	
%w	PVS kg/m ³	%w	PVS kg/m ³	%w	PVS kg/m ³
12.0	1741	10.5	1750	8.7	1805
13.2	1744	12.5	1743	10.6	1793
14.5	1757	13.8	1751	12.4	1810
17.2	1726	16.1	1743	14.5	1809
18.7	1739	18.2	1698	16.5	1821

Tabla 3. Pesos Volumétricos secos y humedad de compactación en suelos con cemento.

En la figura 4 se muestran los resultados de los pesos volumétrico secos obtenidos con sus correspondientes humedades de los tres suelos estabilizados mecánicamente (líneas continuas) y los tres suelos estabilizados mecánica y químicamente (líneas discontinuas).

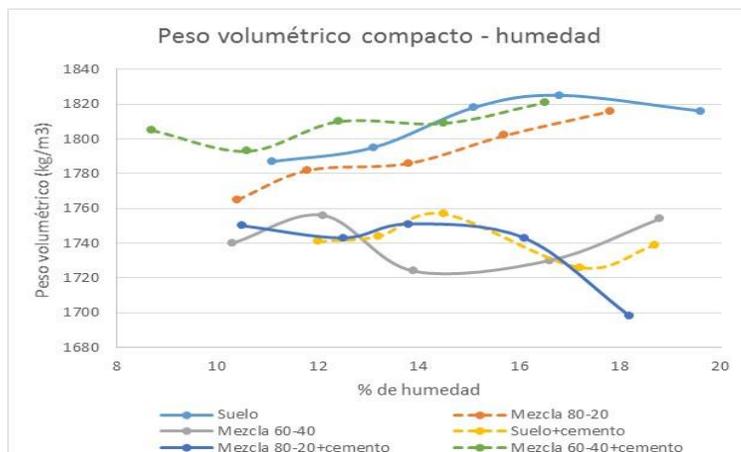


Figura 4. Gráfica de pesos volumétricos secos con sus correspondientes humedades.

Los pesos volumétricos secos obtenidos en la máquina compactadora manual en los suelos sin estabilizar con cemento tienden a valores bajos conforme se incrementa el contenido de la fracción arenosa en el suelo, pero cuando se estabilizaron con el 10% de cemento (en peso del suelo), los mayores pesos volumétricos se obtuvieron en la mezcla con mayores contenidos de gránulos, las otras dos mezclas tuvieron un comportamiento parecido, como puede apreciarse en la gráfica de la figura 4.

En las figuras 5 y 6 pueden apreciarse detalles de la determinación de las propiedades mecánicas de los BTCs, mediante los ensayos a compresión y flexión. En las tablas 4 y 5 se muestran los resultados de los ensayos a compresión axial y flexión de los BTCs relacionados con las humedades de compactación empleadas, y en las figuras 7 a la 9, los resultados gráficos de los datos mencionados.



Figuras 5 y 6. Detalle de ensayos a compresión axial y flexión en BTC.

Suelo			Mezcla 80-20			Mezcla 60-40		
Humedad %w	Compresión Kg/cm ²	Flexión kg/m ²	Humedad %w	Compresión Kg/cm ²	Flexión kg/m ²	Humedad %w	Compresión Kg/cm ²	Flexión kg/m ²
11.1	32.9	4.4	10.4	33.5	3.2	10.3	21.5	1.2
13.1	32.6	5.9	11.8	37.7	3.8	12.1	24.7	1.9
15.1	31.7	7.7	13.8	36.1	4.9	13.9	23.8	1.9
16.8	30.4	8.3	15.7	42.3	5.4	16.6	24.1	3.4
19.6	22.7	8.5	17.8	32.2	6.6	18.8	25.8	4.2

Tabla 4. Humedad de compactación y resultados de las pruebas mecánicas en suelos sin cemento.

Suelo + cemento			Mezcla 80-20 + cemento			Mezcla 60-40 + cemento		
Humedad %w	Compresión Kg/cm ²	Flexión kg/m ²	Humedad %w	Compresión Kg/cm ²	Flexión kg/m ²	Humedad %w	Compresión Kg/cm ²	Flexión kg/m ²
12.0	80.1	8.4	10.5	76.5	8.5	8.7	86.1	8.7
13.2	88.7	6.6	12.5	82.5	6.4	10.6	92.9	9.6
14.5	80.3	6.5	13.8	81.2	5.9	12.4	88.8	9.3
17.2	62.4	5.2	16.1	61.6	5.2	14.5	78.0	8.4
18.7	48.4	4.0	18.2	41.5	3.8	16.5	49.8	6.8

Tabla 5. Humedad de compactación y resultados de las pruebas mecánicas en suelos con cemento.

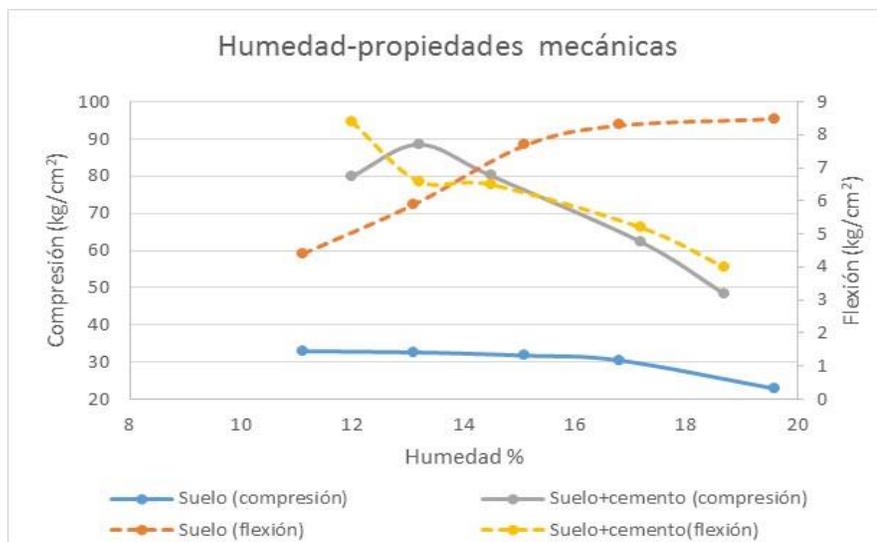


Figura 7. Resultados de los ensayos a compresión axial y flexión en BTCs de suelo y suelo+cemento.

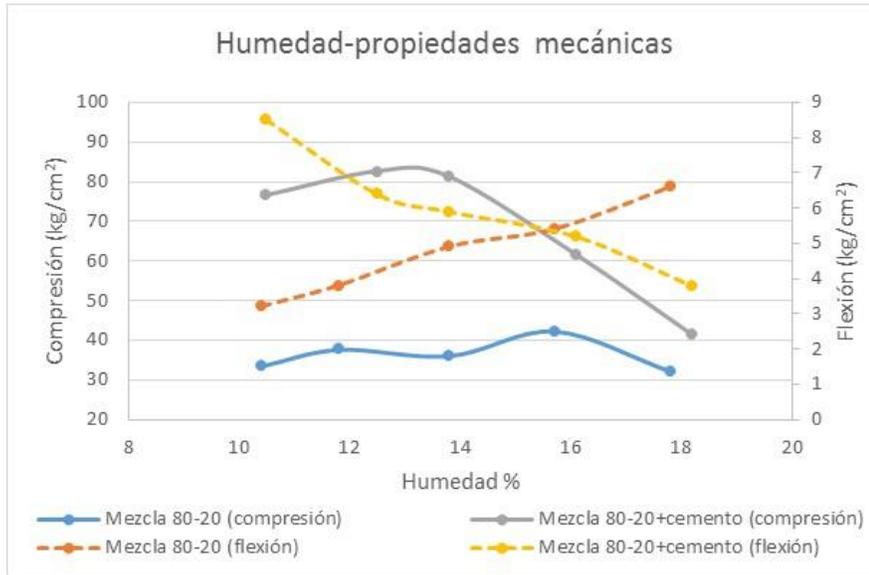


Figura 8. Resultados de los ensayos a compresión axial y flexión en BTCs de la mezcla 80-20 y mezcla 80-20 + cemento.

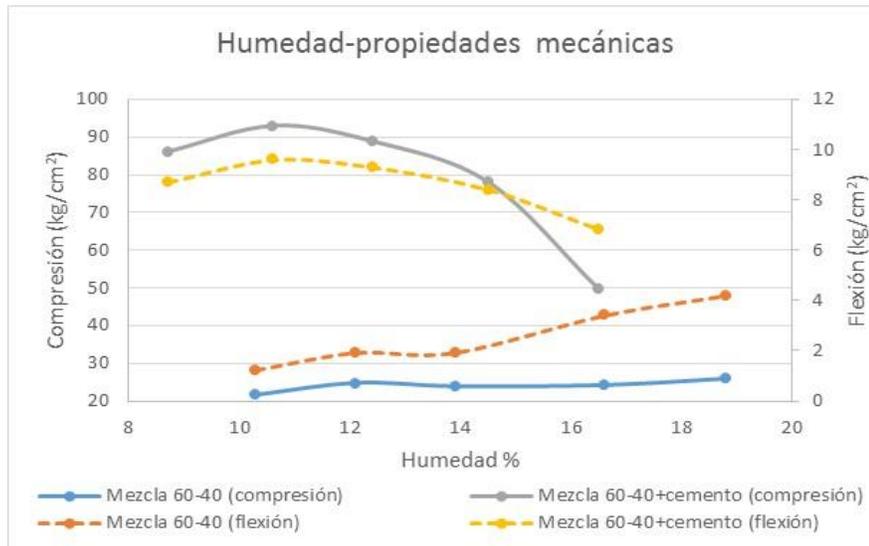


Figura 9. Resultados de los ensayos a compresión axial y flexión en BTCs de la mezcla 60-40 y mezcla 60-40 + cemento.

Se puede apreciar en las gráficas presentadas que en lo referente a la resistencia, a la compresión axial, en el suelo natural y cuando se le adicionó cemento, tiende a disminuir

con el incremento de la humedad durante la elaboración de los BTCs. Respecto a la flexión, el suelo al que se le adicionó cemento para su estabilización, presenta la tendencia antes mencionada, no así en el suelo puro, en donde se aprecia un mejor comportamiento al incrementarse la resistencia a la flexión con el contenido de humedad empleada en la compactación de los BTCs.

Para el caso de la mezcla 80-20, en el suelo sin estabilizar, hay un incremento en la resistencia a la compresión axial en los BTCs, conforme se incrementa la humedad de compactación, decreciendo cuando el suelo tenía demasiada humedad, en la mezcla estabilizada con cemento, hay un incremento a la compresión axial, con los primeros contenidos de humedad y luego decrece en forma importante; en relación con la resistencia a la flexión, esta decrece en la mezcla estabilizada con cemento, presentándose un comportamiento contrario en el suelo sin estabilizar con cemento, porque se incrementa dicha resistencia conforme se incrementa la humedad de compactación.

En el suelo más arenoso, mezcla 60-40, en el suelo sin estabilizar con cemento se aprecia un ligero incremento en la resistencia a la compresión axial (en este suelo se tuvieron las menores resistencias), pero cuando se estabilizó con cemento (aun cuando en estos BTCs se obtuvieron las mayores resistencias a la compresión axial), dichas resistencia decrecieron conforme se incrementó el agua para la compactación de los BTCs, para el caso de los ensayos a flexión, cuando el suelo no contenía cemento, esta resistencia se incrementó con el aumento del contenido de humedad empleada durante la elaboración de los BTC's; en el caso del suelo estabilizado con cemento aun cuando inicialmente se incrementó, finalmente decreció en forma importante.

CONCLUSIONES

En general la humedad empleada en la compactación de los BTCs, influye en las propiedades mecánicas de estos, observándose mayor efecto cuando las humedades son mayores e incluso llegan a afectar la estabilidad dimensional de los bloques, por ello es recomendable realizarles este tipo de estudios para conocer el efecto de la humedad en dichas propiedades, cada suelo es diferente y presenta también un comportamiento

diferente ante las energías empleadas para su estabilización por medios mecánicos, en particular las máquinas compactadoras manuales empleadas por las comunidades para elaborar sus bloques de suelo, proveen una energía de compactación de tipo estático, con las consecuencias en el acomodo del material durante la compactación de los bloques, por el tipo de suelo de que se trate.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- BAHAR, R.; BENAZZOUG, M. Y KENAI, S.: «Performance of compacted cement-stabilised soil», *Cement & Concrete Composites*, Vol.21, pp.811-820, 2004.
- Chávez Ortiz, C.: *La vivienda y el medio ambiente*, Seminario: la vivienda rural y la utilización de ecotecnias, INI-DGOPE, Oaxaca, México, 1985.
- DEĞIRMENCI N.: «The use of industrial wastes in adobe stabilization», *G.U. Journal of Science*, Vol.18, Núm.3, pp.505-515, 2005.
- GHAVAMI, K.; FILHO, R.D.T. Y BARBOSA, N.: «Behaviour of composite soil reinforced with natural fibers», *Cement & Concrete Composites*, Vol.21, pp.39-48, 1999.
- JÍMENEZ DELGADO, M. C. Y CAÑAS GUERRERO, I.: *The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review*, *Construction and Building Materials*, pp.237-251, 2007.
- JUÁREZ BADILLO, E. Y RICO RODRÍGUEZ, A.: *Mecánica de suelos*, Tomo I, Fundamentos de la mecánica de suelos, Ed. Limusa, México, 2001.
- KENAI, S.; BAHAR, R. Y BENAZZOUG, M.: *Experimental analysis of the effect of some compaction methods on mechanical properties and durability of cement stabilized soil*, 2006.
- KHEDARI, J.; WATSANASATHAPORN, P. Y HIRUNLABH, J.: «Development of fibre-based soil-cement block with low thermal conductivity», *Cement & Concrete Composites*, Vol.27, pp.111-116, 2005.
- MORALES DOMÍNGUEZ, V. J.; ORTIZ GUZMÁN, M. Y ALAVÉZ RAMÍREZ, R.: «Mejoramiento de las propiedades mecánicas del adobe compactado», *Naturaleza y desarrollo*, Vol.5, Núm.1, pp.41-48, 2007.
- MOREL, J.C.; MESBAH, A.; OGGERO, M. Y WALKER, P.: «Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction», *Building and*

- environmental*, Vol. 36, Núm.10, pp.1119-1126, 2007.
- REDDY, B.V.: «Steam-cured stabilized soil blocks for masonry construction», *International Journal Energy Building*, Vol.29, pp.29-33, 1998.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes: *Normas de construcción: Muestreo y Pruebas de materiales*, Parte Segunda, Tomo IX, México, 2000.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes: *N-CMT-2-01-001/02 Ladrillos y bloques cerámicos Libro: CMT. Características de los materiales*, parte 2, México, 2005.
- VENKATARAMA REDDY, B. V. Y JAGADISH, K.S.: «Spray erosion studies on pressed soil blocks», *Building and environment*, Vol.22, Núm.2, pp.135-140, 1987.
- YOUNGQUIST, J.A.: *Agricultural fibers for use in building components*, Nueva the Center for Resourceful Building Technology and environmental Building, pp.123-134, 1966.
- WALKER, P.J.: «Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilized soil blocks», *Cement & Concrete Composites*, Vol.17, pp.301-310, 1995.