

PROPIEDADES FÍSICAS DE BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA ESTABILIZADOS CON HIDRÓXIDO DE CALCIO EN POLVO Y EN PASTA

Luis Fernando Guerrero Baca
Universidad Autónoma Metropolitana Xochimilco
Calz. Del Hueso 1100, Edif. 24 Piso 1. Col. Villa Quietud, C.P. 04960. México D.F.
Tel. (52) 54837232. E-mail: luisfq1960@yahoo.es

Rubén Salvador Roux Gutiérrez
Universidad Autónoma de Tamaulipas
Centro Universitario Tampico-Madero. Tampico, Tamaulipas. México.
Te. (52) 8332272828, Ext. 3351. E-mail: rroux@uat.edu.mx

Tema 2: Innovaciones en los componentes constructivos

Palabras-clave: Estabilización, hidróxido de calcio, arcillas

RESUMEN.

En el presente trabajo se presentan los resultados obtenidos en la investigación para determinar la adecuada incorporación de hidróxido de calcio ya sea en polvo y en pasta, con la finalidad de determinar cuál de las dos opciones, es más apropiada para la estabilización de la tierra necesaria para elaborar BTC.

1. INTRODUCCIÓN.

Una gran parte de la población del mundo vive en construcciones hechas de adobe; en consecuencia, se presume que éste es el material utilizado con mayor frecuencia. Asimismo, se ha considerado que en los países en vías de desarrollo, 80% de la población que vive en el campo utiliza a la tierra como material de construcción, además de que 20% de los habitantes de las zonas urbanas de los países industrializados también la utiliza para la edificación de sus viviendas, con técnicas que combinan la tradición y la modernidad.

En los últimos 30 años se han desarrollado nuevas técnicas en la producción de materiales de construcción con base en tierra, los cuales aumentan su competitividad en comparación con los materiales que actualmente se comercializan de manera convencional.

Una de las ventajas que ofrecen los productos elaborados con elementos de tierra es la condición térmica que los hace materiales plausibles para climas extremos, y ello lo demuestra su amplia utilización en las zonas desérticas del mundo, donde los cambios de temperatura son muy drásticos.

Pero a pesar de la gran aplicación de adobe como material para edificios y viviendas populares, resulta ser de lo menos conocidos entre los profesionales que se dedican a la construcción, así como por las dependencias gubernamentales de los distintos países que promueven viviendas para clases populares.

La técnica de Bloques de Tierra Comprimida (BTC) generalmente utiliza sustancias estabilizantes como el cemento Portland, el asfalto o la cal, con la finalidad es darles una mayor resistencia a la absorción de humedad, de aumentar su capacidad de carga y de evitar su degradación por los efectos del impacto del agua. Para esta investigación se ha determinado hacer el estudio del uso de la cal hidratada, la cual se aplica generalmente en polvo para la estabilización de suelos. Sin embargo, como es sabido, existe una larga tradición de uso de cal en pasta para otros usos en la construcción como es el caso de morteros de liga de mamposterías, así como de revoques y punturas al fresco. (Guerrero, 2005, p.130)

La presente investigación pretende ver cuál es el procedimiento de aplicación de cal más adecuado para poder estabilizar un suelo y a la vez ver cuál de los dos métodos da una mejor resistencia a la compresión simple.

La utilización de cal para la estabilización del suelo (especialmente de suelos finos) data de épocas muy antiguas. Las arcillas forman una parte importante del suelo, y generalmente requieren una estabilización para aumentar la resistencia, así como disminuir los cambios volumétricos debidos a modificaciones en su contenido de agua.

La utilización de esta técnica cumple con el plan trazado, obteniéndose varios efectos:

1. Reducción del índice de plasticidad.
2. Aceleración de la disgregación de los grumos arcillosos durante la pulverización, mediante el uso de agua y cal.
3. Reducción de los efectos aglomerados.
4. Reducción de las contracciones y las exiaciones debido a la humedad.
5. Incremento de la resistencia a la compresión.

Para poder utilizar cal como estabilizante, fue necesario determinar los tipos de minerales arcillosos contenidos en el suelo a estabilizar, ello permitió optimizar el procedimiento y predecir el resultado.

1.1. Ciclo de la cal.

El material constructivo que se conoce comúnmente como cal es el producto de un proceso de calcinado, rehidratación y secado de rocas de origen calizo. Este fenómeno resulta sumamente interesante debido a los factores ecológicos que involucra.

Se trata de un desarrollo de tipo cíclico que inicia con la transformación del carbonato de calcio — CaCO_3 , mineral de origen sedimentario— y concluye con la generación del mismo material, pero mediante un procedimiento artificial. Para comprender de manera más clara esta “metamorfosis”, se puede explicar a partir de lo que se conoce como el “ciclo de la cal”. (Guerrero, 2006, p.53)

Todo comienza con la extracción de rocas con alto contenido de carbonato de calcio del medio natural. La mayoría de las veces, las calizas están contaminadas con carbonato de magnesio, MgCO_3 (dolomita), material que es indeseable en la construcción por sus problemas de solubilidad en agua. Además de las piedras o minerales inorgánicos, existen otros elementos orgánicos ricos en calcio que históricamente han sido utilizados para su extracción como son las conchas, corales y caracoles marinos.

Todas estas fuentes se presentan en la naturaleza acompañadas de substancias como el hierro y el magnesio, que dentro de este proceso se consideran impurezas o contaminantes debido a que su presencia modifica el comportamiento esperado para el producto final. Para que la piedra caliza sea apta para fines constructivos deberá contar con por lo menos 90% de carbonato de calcio, de otro modo la cal resultante será de mala calidad.

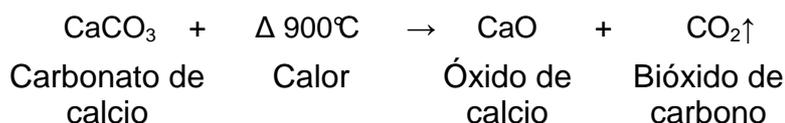
En el pasado, se sabía por experiencia transmitida de modo tradicional que la piedra caliza que producía buena cal era la que presentaba un color claro uniforme y con pocas manchas amarillas, anaranjadas, rojas o negras, que suelen ser sintomáticas de la presencia de hierro. Además, al golpear entre sí dos fragmentos de piedra con alto contenido de carbonato de calcio, se produce un sonido de tipo metálico que ayuda a su identificación.

Hoy en día, para la producción industrial de cal se manejan cuidadosos análisis químicos que permiten verificar la pureza de la piedra caliza utilizada como materia prima.

Este producto natural es sometido a temperaturas de entre 900 y 1 300°C en hornos especialmente diseñados que antaño utilizaban leña o carbón como combustible, pero que en la actualidad funcionan a base de gas.

Por el efecto del calor, en esta etapa el material base se transforma en óxido de calcio, al tiempo que desprende dióxido de carbono como un gas que se eleva a la atmósfera.

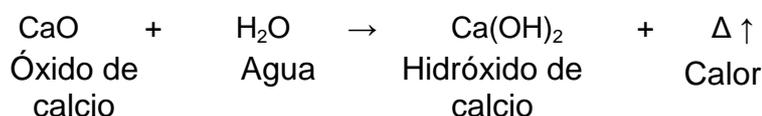
La reacción se puede representar químicamente de la siguiente manera:



El óxido de calcio, al que comúnmente se le denomina “cal viva”, es un producto inestable que perdió parte de su peso durante la calcinación. Es una sustancia ávida de agua que, si no se controla de forma adecuada, la puede intercambiar con el aire y a perderla posteriormente con lo que recupera el equilibrio que mantenía en su origen como carbonato de calcio.

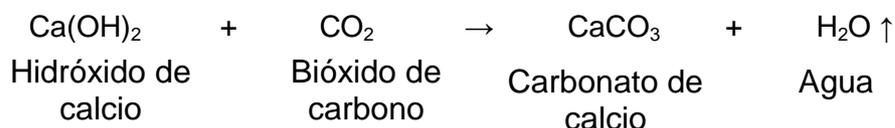
Resulta un material sumamente cáustico y corrosivo, pues reacciona muy fácilmente con cualquier fuente de humedad, pero tiene la cualidad de que, al momento de agregársele agua, adopta un estado “latente” que permite su uso inmediato o su almacenamiento al convertirse en lo que se conoce como “cal apagada” o “cal hidratada”.

Lo que sucede a nivel químico es que el óxido de calcio toma el hidrógeno y oxígeno del agua y se transforma en hidróxido de calcio, que es un material con consistencia fluida, que, mientras se mantenga aislado del aire, puede conservar sus cualidades durante meses o años. La hidratación o “apagado” de la cal viva es una reacción en la que se desprende calor.



La pasta de cal es sumamente versátil y puede ser utilizada como insumo para pinturas, morteros o mezclas constructivas.

La etapa con la que concluye el ciclo de la cal se desarrolla cuando el hidróxido de calcio toma bióxido de carbono del aire y pierde agua por evaporación, en un proceso en el que se endurece al recuperar su estado original como carbonato de calcio, es decir, se convierte nuevamente en roca.



1.2. Acción de la cal en las arcillas

La aplicación de cal sobre los tres tipos de arcillas más comunes trae como resultado diferentes efectos. En el caso de las montmorillonitas, se presentan fuertes reacciones con la adición de la cal, y en consecuencia el material estabilizado presenta profundas modificaciones en su comportamiento.

Con las caolinitas se muestra un aumento de cristales de calcita, con la ausencia total de otros minerales; y con las ilitas la cal reacciona con el azufre, formado sulfatos, lo que provoca una baja reacción con la cal y por lo tanto escasos cambios en su comportamiento final.

La acción de la cal se puede advertir en dos fases:

Primera etapa: en ésta se observa la acción producida por el aporte masivo de iones a causa de la cal. Los cationes de calcio se unen a la arcilla debido al intercambio catiónico, lo cual provoca la unión de las partículas arcillosas. Esto genera una floculación a edades tempranas, lo cual ayuda a aumentar o disminuir el límite líquido de los materiales térreos, así como a favorecer un aumento del índice plástico, lo que hace que el suelo se vuelva menos sensible al agua.

Segunda etapa: en ésta las arcillas reaccionan en forma regular, dependiendo de la naturaleza de los materiales arcillosos. Ello se traduce en una degradación de los mismos elementos

mineralógicos, apareciendo nuevos, dando como resultado un aumento en la resistencia en la compresión simple.

Como ya se comentó, el objetivo general de la presente investigación es determinar la forma más adecuada de incorporación de la cal en los BTC específicamente, —en polvo o en pasta— y los efectos que se presentan en la resistencia a la compresión simple en estado seco.

Los objetivos específicos son:

1. Seleccionar el suelo adecuado para la fabricación de los bloques de tierra comprimida.
2. Evaluar las características de los BTC estabilizados con cal en polvo o cal en pasta respecto a la compresión simple en estado seco.
3. Determinar las proporciones adecuadas de cal para la fabricación de los BTC.

2. METODOLOGÍA

2.1. Diseño de la estabilización

“El diseño de la estabilización con cal, se basa en las características deseadas en el suelo estabilizado, considerándose indispensable conocer las características originales de los minerales arcillosos, para de este modo beneficiarse de las ventajas que se obtendrán con el empleo de cal” (Fernández, 1992, p.129).

Existen varios procedimientos para el diseño de un suelo-cal, pero cualquiera que sea el método, hay un punto donde el contenido de cal no produce ninguna mejoría; a éste se le conoce como “punto de fijación”, y significa que la reacción potencial de los minerales arcillosos queda satisfecha.

Uno de los métodos más empleados es el que se conoce con el nombre de *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), en éste se emplean pruebas de compresión simple, previa determinación del contenido de cal, por medio de una gráfica (gráfico 1), para lo cual se hacen necesarios los datos de porcentaje de suelo para pasar la malla número 4 y el índice plástico (Fernández, 1992).

Se deben hacer tres especímenes de prueba y obtener el resultado después de curarlos. Por recomendación de la *National Lime Association* de Estados Unidos, el procedimiento de construcción de una estabilización con cal debe estar conformado por los siguientes pasos:

1. Utilizar cal hidratada que cumpla con las especificaciones correspondientes.
2. Disgregar la arcilla, y realizar el mezclado en dos etapas, utilizando sólo 50% de cal calculada en el diseño en cada una de las etapas.
3. Adicionar la cal de manera dosificada, de acuerdo con el peso seco del suelo.
4. Mezclar de manera inicial con el propósito de distribuir la cal de manera uniforme, para lo cual se deberá agregar agua hasta 5% por arriba de la humedad óptima.
5. Aplicar un curado que va de 1 a 48 horas para lograr que la arena y la cal rompan los grumos de arcilla.
6. Comparar con las pruebas de elaboración realizadas previamente.

El proceso de fabricación se inicia con la selección y aptitud del suelo. Al no encontrar un suelo con las características ideales en la zona de estudio, se decidió en este caso fabricar uno con la mezcla de una arcilla de baja plasticidad (CL, 60 %) y una arena limosa (40 %), incorporándole 3, 5 y 7 % de cal en polvo y en pasta, como primer estabilizador.

Dichas poblaciones fueron estabilizadas con cal en polvo y en pasta en las siguientes proporciones: la primera con 3% de cal en polvo en peso, la segunda con 5% en polvo en peso, y la tercera con 7% de cal en polvo en peso. En el caso de la cal en pasta se colocó la misma proporción de cal en peso en agua y se dejó 24 horas. Posteriormente se le incorporó la pasta de cal utilizando una criba para homogenizar la incorporación y se redujo el agua de mezclado para no alterar el contenido de humedad. Una vez fabricadas las poblaciones, se les dejó secar a la sombra durante tres días, y posteriormente al sol durante 12 días; más adelante se tomaron 10 especímenes de cada población de forma aleatoria, y se realizó la prueba de resistencia a la

compresión, verificando que en todo momento se trabajara en estado seco, apegándose a las normas NMX-C-36-1983 y NMX-C-6-1976.

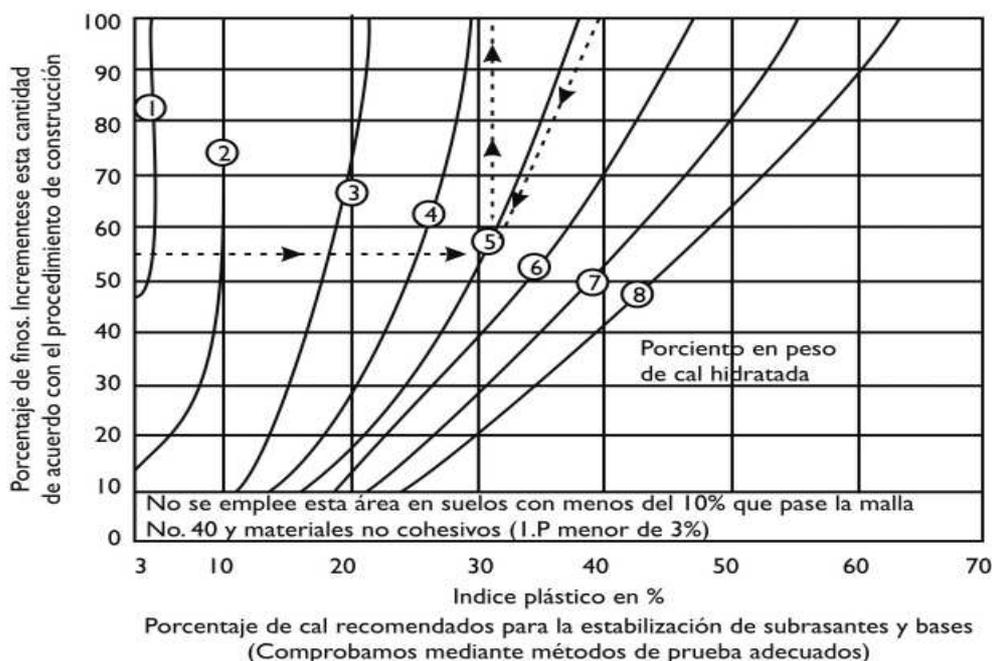


Gráfico 1. Método de la AASHTO para las estabilizaciones con cal Fuente: Carlos Fernández Loaiza (1992), *op. cit.*, p. 129.

La Tabla 1 muestra las proporciones de los diversos materiales para producir 14 bloques de 14 x 28 x 10 cm. (Ver foto 1)

Material	Cantidad	Unidad
Arcilla de baja plasticidad	21.00	Kg
Arena limosa	23.00	Kg
Agua	6.00	Lts.
Cal 3%	1.33	Kg
Cal 5%	2.22	Kg
Cal 7%	3.10	Kg

Tabla 1. Mezcla de materiales

2.2. Fabricación de los especímenes.

Para fabricar los especímenes se utilizó una mezcla con las características mencionadas anteriormente, los ingredientes se mezclan en una revolvedora de turbina de la marca Ital Mexicana modelo TR-60, que tiene una capacidad de 0.80 m³, lo que le permite producir 3.00 m³ por hora. Una vez que se tuvo la mezcla se procedió a llenar la prensa la cual en este caso es una CINVA – RAM cuyo molde mide 14.1 x 28.1 x 20.3 centímetros y que la fuerza que se le aplica es la que genera una persona al aplicar el principio de la palanca sobre un émbolo que se encuentra en la base del molde.



Foto 1. Análisis del suelo. Fuente Dr. Rubén S. Roux

La mezcla se colocó dejándola caer de una altura de 5 centímetros por encima del molde y sólo se pre - comprimieron las esquinas para obtener un mejor resultado, el producto final fue un bloque de tierra comprimida de 14 x 28 x 10.5, el cual se dejó secar a la sombra 3 días hidratándolo como forma de curado con un aspersor de lluvia fina y para posteriormente ponerlo a secar al sol durante los 7 días restantes.

2.3. Curado de los especímenes

Con la finalidad de garantizar la resistencia a la compresión simple, se planteó un curado con agua a los especímenes 3 horas después de su fabricación, que se hizo por medio de un aspersor que pulveriza el agua finamente mojándose los BTC por todas sus caras. Se repitió esta operación, durante 3 días, para evitar la vaporización del agua de curado producto de temperatura y viento, procediéndose a cubrir los especímenes con un polietileno como barrera, a fin de evitar la evaporización temprana del agua.

2.4. Muestreo

El muestreo que se aplicó se apegó a la *Norma Oficial Mexicana*, NOM-C-10-1986, la cual indica que se recomienda tomar aleatoriamente 10 piezas como mínimo, por cada lote de diez mil piezas o fracción.

Resultados:

RESULTADOS DE BTC ESTABILIZADOS CON CAL AL 3% EN POLVO Y EN PASTA						
No. DE ESPECÍMENES POR POBLACIÓN = 25						
EDAD DE LOS ESPECÍMENES AL REALIZAR LA PRUEBA: 15 DÍAS						
	POBLACIÓN CON CAL EN POLVO			POBLACIÓN CON CAL EN PASTA		
No.	TON	ÁREA	RESISTENCIA en Kg/cm ²	TON	ÁREA	RESISTENCIA en Kg/cm ²
1	1.64	0.0392	41.84	0.93	0.0392	23.72
2	2.04	0.0392	52.04	0.72	0.0392	18.37
3	2.00	0.0392	51.02	0.84	0.0392	21.43
4	1.76	0.0392	44.90	0.99	0.0392	25.26
5	1.68	0.0392	42.86	0.69	0.0392	17.60
6	1.72	0.0392	43.88	1.05	0.0392	26.79
7	1.87	0.0392	47.70	0.77	0.0392	19.64
8	1.99	0.0392	50.77	0.97	0.0392	24.74
9	2.01	0.0392	51.28	1.01	0.0392	25.77
10	1.60	0.0392	40.82	0.60	0.0392	15.31
			46.71			21.86

RESULTADOS DE BTC ESTABILIZADOS CON CAL AL 5% EN POLVO Y EN PASTA						
No. DE ESPECÍMENES POR POBLACIÓN = 25						
EDAD DE LOS ESPECÍMENES AL REALIZAR LA PRUEBA: 15 DÍAS						
	POBLACIÓN CON CAL EN POLVO			POBLACIÓN CON CAL EN PASTA		
No.	TON	ÁREA	RESISTENCIA en Kg/cm ²	TON	ÁREA	R RESISTENCIA en Kg/cm ²
1	1.81	0.0392	46.17	0.99	0.0392	25.26
2	1.77	0.0392	45.15	0.88	0.0392	22.45
3	1.90	0.0392	48.47	0.65	0.0392	16.58
4	1.85	0.0392	47.19	1.86	0.0392	47.45
5	1.99	0.0392	50.77	1.19	0.0392	30.36
6	1.89	0.0392	48.21	1.01	0.0392	25.77
7	2.06	0.0392	52.55	0.86	0.0392	21.94
8	2.53	0.0392	64.54	1.26	0.0392	32.14
9	2.42	0.0392	61.73	1.31	0.0392	33.42
10	2.33	0.0392	59.44	0.95	0.0392	24.23
			52.42			27.96
RESULTADOS DE BTC ESTABILIZADOS CON CAL AL 7% EN POLVO Y EN PASTA						
No. DE ESPECÍMENES POR POBLACIÓN = 25						
EDAD DE LOS ESPECÍMENES AL REALIZAR LA PRUEBA: 15 DÍAS						
	POBLACIÓN CON CAL EN POLVO			POBLACIÓN CON CAL EN PASTA		
No.	TON	ÁREA	RESISTENCIA en Kg/cm ²	TON	ÁREA	R RESISTENCIA en Kg/cm ²
1	3.38	0.0392	86.22	1.67	0.0392	42.60
2	2.51	0.0392	64.03	1.53	0.0392	39.03
3	2.98	0.0392	76.02	1.43	0.0392	36.48
4	3.03	0.0392	77.30	1.69	0.0392	43.11
5	3.50	0.0392	89.29	1.79	0.0392	45.66
6	2.44	0.0392	62.24	1.35	0.0392	34.44
7	3.36	0.0392	85.71	1.44	0.0392	36.73
8	3.25	0.0392	82.91	1.80	0.0392	45.92
9	3.67	0.0392	93.62	1.91	0.0392	48.72
10	3.11	0.0392	79.34	1.58	0.0392	40.31
			79.67			41.30

3. CONCLUSIONES:

Los mejores resultados a la compresión simple se obtuvieron en los especímenes con cal en polvo, con un incremento de un 98.01% sobre los de cal en pasta. Las diferencias individuales entre poblaciones fueron:

Los especímenes del 3%, los de cal en polvo presentaron 113.67% mayor resistencia a la compresión simple que los de pasta.

Los especímenes del 5%, los de cal en polvo presentaron 87.48% mayor resistencia a la compresión simple que los de pasta.

Los especímenes del 7%, los de cal en polvo presentaron 92.90% mayor resistencia a la compresión simple que los de pasta.

El incremento en la resistencia de los especímenes con cal en polvo de 3 a 5% fue de 12.22% y de 51.73% para los especímenes de 5 a 7%.

El caso de los especímenes con cal en pasta también presentaron incremento de resistencia a la compresión simple y estos fueron de un 27.90% entre los especímenes de 3 a 5% y de 47.71% entre los especímenes de 5 a 7%.

La disminución en la resistencia en el caso de los especímenes con cal en pasta se presenta como consecuencia de la generación de grumos con el suelo en su proceso de incorporación y la resultante falta de homogenización de la mezcla, lo que provoca la generación de bloques con muchas fisuras. De este modo queda comprobada la eficiencia del uso de la cal en polvo como estabilizante de suelos que han de ser utilizados para elaborar bloques de tierra comprimida.

BIBLIOGRAFÍA

- Carvalho, Adilson (1997), *Estabilização de solos com adições com cal*, ABPC, Boletim núm. 13, São Paulo.
- Fernández Loaiza, Carlos (1992), *Mejoramiento y estabilización de suelos*, México, Limusa.
- Eades, J.L. y Grim, R.E., (1966). "A quick test to determine lime requirements for lime stabilization". *Highway Res. Rec. Bull.* No. 139.
- Guerrero, L., (2005). "Lime in the construction and restoration of the Mexican architectural heritage". *Lime: Technical advances for conservation and case studies*, Consejo de Monumentos Nacionales, Santiago de Chile.
- Guerrero, L., (2006). "Aplicación de la cal en estructuras tradicionales de tierra". *Anuario de Investigación sobre Diseño Sustentable*, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tampico.
- Guerrero, L., (2008). "La cal y el patrimonio edificado". *La Gaceta del Instituto del Patrimonio Cultural*, No. 12, Abril, Oaxaca.
- Juárez Badillo, Eulalio; Rico Rodríguez, Alfonso (1975). *Mecánica de suelos, tomo I, fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Limusa.
- Mateos, M., (1966). "Estudios sobre suelo-cal". *Revista de Obras Públicas*, 114, tomo I (3009) Enero, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid.
- Monjo, J., (1998). "La evolución histórica de la arquitectura de tierra en España". *Arquitectura de tierra. Encuentros Internacionales*. Centro de Investigación Navapalos. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Oliveira, M., Santiago, C. y D’Affonseca, S., (1990). "The study of accelerated carbonation of lime-stabilized soils". *International Conference on the Conservation of Earthen Architecture*, Las Cruces, New Mexico, The Getty Conservation Institute-US/ICOMOS, Los Angeles.
- Roux Gutiérrez Rubén Salvador (1990). *Utilización del material adobe para la vivienda popular en la zona conurbada de la desembocadura del río Pánuco*. Tampico: Facultad de Arquitectura de la U.A.T.
- Roux Gutiérrez Rubén Salvador (2010). *Los Bloques de Tierra Comprimida en Zonas Húmedas*. México: Plaza y Valdés.
- Sampedro, Á., (2005). *Tratamientos de suelos con cal*, ANCADE, Madrid.
- SECOFI, D.G.N. (1983). *Norma oficial mexicana, NMX-C-036-1983. Industria de la construcción – ladrillo, bloques y adoquines de concreto- resistencia a la compresión simple –método de prueba*. Naucalpan: Ed. Dirección General de Normas de la SECOFI.
- SECOFI, D.G.N. (1986). *Norma oficial mexicana, NMX-C-010-1986. Industria de la construcción – concreto, bloques, ladrillos, tabiques y tabicones*. México: Dirección General de Normas de la SECOFI.
- SECOFI, D.G.N. (1986). *Norma oficial mexicana, NMX-C-037-1986. Industria de la construcción – concreto - bloques – ladrillos o tabicones de concreto- determinación de la absorción de agua*; México: Dirección General de Normas de la SECOFI.

Currículum:

Luis Fernando Guerrero Baca, arquitecto, Maestro en Restauración Arquitectónica, Doctor en Diseño con Especialidad en Conservación del Patrimonio. Profesor Investigador de la UAM-Xochimilco. México. Coordinador del Comité Científico de Tierra del ICOMOS Mexicano, así como de la Red Iberoamericana PROTERRA.

Rubén Salvador Roux Gutiérrez, arquitecto, Doctor en Arquitectura por La Universidad de Sevilla. Profesor de la Universidad Autónoma de Tamaulipas, Tampico, México. Líder del Cuerpo Académico de Diseño y Edificación Sustentable de la FADU.