EL SUELO-CEMENTO, UN RECURSO TECNOLÓGICO PARA LA CONSTRUCCIÓN DE EDIFICIOS

Carlos E. Alderete- Lucía E. Arias**- Stella M. Latina***- Rafael F. Mellace******
Mirta E. Sosa*** - Irene C. Ferreyra********
Centro Regional de Investigación en Tierra Cruda, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad Nacional de Tucumán- Av. Roca 1800, + 54 381 4364093 int.7919, criatic@herrera.unt.edu.ar

RESUMEN

Las técnicas de construcción con tierra, profusamente utilizadas desde los comienzos de la civilización, representan un claro ejemplo del uso racional de recursos naturales en una completa armonía entre el hombre y la naturaleza. En la actualidad, impulsadas por constantes investigaciones en el ámbito mundial, se registran interesantes innovaciones tecnológicas caracterizadas por: simplicidad, eficiencia, economía y bajo impacto ambiental. Entre ellas, el suelo-cemento como insumo básico, destaca una de las posibilidades del uso de la tierra para la construcción de edificios. Su aplicación según diferentes técnicas constructivas permiten la resolución de la envolvente (muros, pisos y techos) conformando elementos monolíticos, mampostería de bloques o de ladrillos prensados y entramados. En la Argentina, el bloque de suelo cemento (BSC) como componente básico ha sido utilizado desde hace décadas aunque sin continuidad ni seguimiento respecto de su desempeño constructivo-estructural. En el Centro de Investigaciones sobre Arquitectura de Tierra Cruda (CRIATiC) se desarrollan diferentes alternativas para la ejecución de muros y de techos que se aplican en la construcción de su edificio sede como prototipo arquitectónico y constructivo. En el trabajo se sintetizan los resultados logrados con la aplicación de distintas técnicas, se analizan la incidencia de las propiedades físicas y mecánicas de los BSC utilizados, tipo y características de los morteros empleados y sus dosificaciones apropiadas a fin de verificar simultáneamente requerimientos estructurales y máxima economía. En resumen, se presenta la evolución constructiva del proyecto CRIATiC concebido como un conjunto de edificaciones, cada uno de los cuales se resuelve acorde a su propia función con una técnica constructiva particular.

* Alderete, Carlos E: Ingeniero Civil. Docente de Construcciones 1 y Arquitectura de Tierra Cruda – FAU-UNT. Director del Laboratorio de Materiales y Elementos de Edificios (LEME) - FAU – UNT - Integrante del CRIATiC y de equipos de investigación en proyectos del CIUNT y de la ANPCyT. - ce: calderete18@hotmail.com

**Arias, Lucía E: Ingeniero Civil. Docente de Construcciones 1 y Arquitectura de Tierra Cruda - FAU - UNT Integrante del CRIATiC y de equipos de investigación en proyectos del CIUNT y de la ANPCyT. - ce: arias-alderete@arnet.com.ar

***Latina, Stella M.: Arquitecta. Docente Construcciones 1 y Arquitectura de Tierra Cruda - FAU - UNT - Integrante del CRIATiC y de equipos de investigación en proyectos del CIUNT y de la ANPCyT. - ce: smlatina05@hotmail.com

****Mellace, Rafael F: Arquitecto. Profesor Titular Construcciones 1, Arquitectura de Tierra Cruda y Diseño y Construcción con Madera - FAU - UNT - Director Centro Regional de Investigaciones de Arquitectura de Tierra Cruda (CRIATiC) - FAU - UNT - Director Proyectos de investigación del CIUNT y de la ANPCyT - ce: rfmellace@arnet.com.ar

*****Sosa, Mirta E: Arquitecta. Docente Construcciones 1 y Arquitectura de Tierra Cruda - FAU - UNT - Integrante del CRIATiC y de equipos de investigación en proyectos del CIUNT y de la ANPCyT. ce: mirta_sosa@hotmail.com

*******Ferreyra, Irene C : Arquitecta. Docente Construcciones I - FAU - UNT. Integrante del CRIATiC y de equipos de investigación en proyectos del CIUNT y de la ANPCyT. –
ce: icferreyra@hotmail.com

El proyecto se materializa a partir de una gestión interinstitucional, en la que intervienen organismos de Ciencia y Técnica de la Nación (CIUNT, ANPCYT, UNT), la Municipalidad de San Miguel de Tucumán y los beneficiarios de planes sociales para personas desocupadas (Jefas y Jefes de Hogar).

I. INTRODUCCION

Desde los primeros asentamientos humanos hace 10.000 años, prácticamente todas las civilizaciones desarrolladas alrededor del mundo han empleado la tierra -soporte y sustento de la vida- para levantar viviendas y ciudades: murallas, palacios, iglesias, mezquitas, modestas casas de una planta y elegantes edificios en altura se erigieron usándola como principal material de construcción. Importantes testimonios arqueológicos, hoy declarados patrimonio histórico de la Humanidad, perduran desde hace siglos en los cinco continentes confirmando que, bajo ciertas condiciones, las construcciones con tierra cruda conservan al resguardo del tiempo sus cualidades físicas, mecánicas y ambientales. Prueba de ello son las centenarias ciudades de Shiban o Sanná en Yemen, de Paquimé o Casas Grandes en México, Chan-Chan en Perú, o de Tulor en Chile.

En nuestro continente, la construcción con tierra cruda fue el sistema dominante en las ciudades Iberoamericanas durante el período colonial alcanzando su máximo desarrollo tecnológico a fines del siglo XIX hasta las primeras décadas del presente siglo. Luego, la aparición de otros materiales impulsados por el avance de la industrialización y el crecimiento del consumo marcaron un lento y largo período de declinación, llegándose a cuestionar su aceptabilidad social y reduciendo su aplicación casi exclusivamente al medio rural como un fenómeno marginal, sinónimo de precariedad y pobreza. Sin embargo lejos de desaparecer, las construcciones con tierra cruda son hoy en día un hecho innegable y, en muchos países una solución irremplazable. Tanto es así, que según estimaciones de la ONU, un tercio de la población mundial vive actualmente en casas de tierra.

En la Argentina se sigue construyendo con tierra en forma espontánea prácticamente en todo el país y, con pequeñas mejoras técnico-ambientales y económicas en viviendas y edificios públicos en zonas áridas y semiáridas. Sin embargo, a pesar de la iniciativa de algunos organismos estatales (Institutos de la Vivienda, Dirección de Arquitectura) y básicamente en Centros de Investigaciones Autónomas de las Universidades Nacionales, el apoyo oficial en el tema es muy débil.

En el resto del mundo, el creciente interés por el estudio de las *"geoarquitecturas"* (A. Hays. 1993) que se manifiesta desde la década de los años 80, favorece el desarrollo de un nuevo rigor técnico-constructivo a partir de la revalorización de este material de aparente y de relativa fragilidad. Organismos internacionales como UNESCO, ICOMOS, ICCROM; GETTY INSTITUTE (USA); Fundaciones, Universidades y ONGs. han impulsado en todo el mundo (Europa Central; Norte de África; Tailandia; Madagascar; USA; México, Nicaragua, Perú, Chile, Brasil, Argentina) la producción de importantes investigaciones y de obras destinadas a: viviendas, hospitales, iglesias, escuelas y otros edificios del hábitat social. La construcción con tierra representa hoy un gran potencial de desarrollo, especialmente en la producción de viviendas de interés social, por lo que resulta relevante actualizar, perfeccionar y proponer nuevos desarrollos en esta tecnología vernácula, aparentemente humilde, pero a la vez compleja y de gran interés por su innegable dimensión social, económica y política.

Desde esta perspectiva, el uso de la tierra -materia prima abundante, económica y reciclable como ninguna otra- constituye en nuestro país, una alternativa eficaz para proveer de viviendas dignas a amplios sectores de nuestra población, hoy carentes de techo. El uso del suelo-cemento como insumo básico, destaca una de las posibilidades de la construcción con tierra para la producción de edificios.

II. MATERIAL: SUELO CEMENTO

a) Definición

Se define como el material resultante de la mezcla de: suelo, cemento y agua que dosificada convenientemente confiere al producto resultante propiedades físicas y mecánicas determinadas. Cuando el material es compactado en su proceso de fabricación se conoce como suelo cemento comprimido.

b) Composición

- **Tierra**

Si bien la tierra como material de construcción se encuentra disponible en cualquier lugar del mundo (salvo en los casquetes polares), no todas son adecuadas para su directa utilización, por lo que frecuentemente resulta necesario modificar las proporciones naturales de sus componentes para obtener un comportamiento más apropiado en función del sistema constructivo y de la técnica de ejecución a utilizarse. Para construir con tierra cruda es de suma importancia procurar la utilización del material disponible en el lugar de la obra. Sin embargo, no siempre aquella tierra es la más adecuada ni la de mejor calidad; En tal caso, resulta necesario mejorar sus características mediante procesos de estabilización.

- **Cemento**

La incorporación de cemento, modifica las propiedades de la tierra por reacción fisico-química entre sus partículas y el producto estabilizante (cemento), creando un esqueleto inerte o formando ligamentos químicos estables. Incorpora en la estructura granular de la tierra una matriz tridimensional que produce una consolidación por cementación, impidiéndole posteriores movimientos.

c) Compactación

Es un método de estabilización mecánica mediante el cual se incrementa la densidad de la tierra reduciendo la porosidad y la permeabilidad; aumentando la compacidad, la resistencia mecánica y la durabilidad del producto resultante.

III. PROPIEDADES DEL MATERIAL SUELO CEMENTO

La determinación de las aptitudes de un material para ser empleado en la construcción de edificios, sólo es posible a partir del conocimiento de sus propiedades físicas, mecánicas y tecnológicas. Por ello, el suelo cemento comprimido fue sometido al protocolo de ensayos que establecen la normas, a fin de definir su uso más adecuado. Los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el CRIATiC permiten concluir que a diferencia de otros materiales denominados “tradicionales”, utilizados en la resolución constructiva de la envolvente, el suelo cemento comprimido puede ser diseñado y fabricado en función de las necesidades y/o requerimientos arquitectónico, estructural, ambiental y tecnológico definido para cada situación particular. Se trata de un formáceo, ejecutado insitu que adopta la forma del molde donde es comprimido.

Por lo tanto, sus propiedades físicas serán función de la forma, de la textura y de las dimensiones asignadas al molde; la compacidad, la porosidad y el peso unitario dependerán de la tasa de compresión efectuada sobre el material.

La respuesta a la acción de las fuerzas exteriores será función del sistema de compactación y de las dosificaciones (suelo/cemento) más adecuadas definidas previamente en el laboratorio para máxima economía, en función del estado de solicitaciones generadas por el diseño arquitectónico-estructural adoptado y el emplazamiento de la obra, aún en zonas de elevado riesgo sísmico. Por tratarse de un material conformado con tierra, las exigencias de acondicionamiento ambiental son fácilmente satisfechas por su reducida transmitancia térmica posibilitando elementos constructivos de menor espesor que los realizados con otros materiales. La posibilidad de controlar las propiedades requeridas permite la fabricación de componentes y de elementos constructivos que se constituyen en cerramientos verticales (muros) y horizontales (pisos techos) ejecutados con diversas tecnologías descriptas más adelante.

IV. ENVOLVENTE

El hombre necesita de un espacio físico donde pueda desarrollar sus actividades. Un espacio delimitado en función de sus necesidades por elementos constructivos horizontales y verticales que conforman la envolvente exterior convirtiéndose en nuestra segunda piel, según lo expresado por el Arq. Ramírez Ponce. Analizando los materiales que normalmente se utilizan para la resolución de dicha envolvente, no todos pueden satisfacer los requerimientos ambientales, constructivos y estructurales simultáneamente, sin necesidad de otros complementarios. Esto es así, debido a que llegan a la obra con propiedades definidas que no pueden ser modificadas debiéndose recurrir al diseño del elemento constructivo en función de los materiales intervinientes.

Sin embargo, el empleo de suelo cemento puede ser una respuesta a estas necesidades con significativa reducción de costos mediante la aplicación de tecnologías apropiadas y apropiables según el caso, fundamentándose en las propiedades del material.
La materialización de componentes y/o elementos constructivos da lugar a la conformación de cerramientos concebidos mediante técnicas de ejecución simple y tradicional que aseguren edificaciones seguras y confiables. En tal sentido, el diseño de construcciones con suelo cemento comprimido debe atender especialmente las consideraciones de diseño sismorresistente siempre que exista la probabilidad de ocurrencia. Las investigaciones en el CRIATiC hicieron posible la verificación del adecuado comportamiento de este tipo de construcciones así como la factibilidad de adecuar las normativas vigentes respecto de otros materiales para garantizar su correcto desempeño.

IV.1 Cerramientos verticales

Una de las aplicaciones más usuales del suelo cemento comprimido es la construcción de muros ejecutados mediante distintas técnicas o sistemas.
Así se puede definir los sistemas de mampostería basados en la yuxtaposición y superposición de mampuestos unidos mediante mezclas del mismo material o simplemente encastrados mecánicamente sin necesidad de morteros. Otra técnica consiste en la ejecución de muros monolíticos (tapial) obtenidos por la generación

misma del elemento estructural. Se describen los requerimientos de cada sistema en el diseñó de construcciones con tierra.

A. Mampostería

A.1 Mampostería con junta de asiento

Este tipo de mampostería se realiza mediante el uso de mampuestos de suelo cemento comprimido (BSC), cuyas propiedades físicas y mecánicas son previamente definidos en función del diseño arquitectónico-estructural.

fig. 1 Muro de BSC

a- Mampuestos

Tabla 1. Resistencia característica del BSC

Tipo de mampuesto	f'_u	f_{um}	$\delta_{m\ máx}$	Nº de muestras por lote	Nº de lotes
BSC	5,0 MPa	7,0 MPa	0,12	10 u	120

(Resultados obtenidos en la construcción del proyecto CRIATiC)

Donde:

f'_u : resistencia característica del BTC
f_{um}: valor promedio de las resistencias determinadas mediante ensayos
δ_m: coeficiente de variación
Lote: conjunto de 250 unidades (producción diaria)

b- Morteros

Tabla 2. Resistencia del mortero

Tipo de mortero	Calidad de resistencia	Resistencia mín a compresión a 28 días	Dosificación
N	Normal	5,0 MPa	1: cemento – 2: suelo 1: arena

(Resultados obtenidos en la construcción del proyecto CRIATiC)

c. Mampostería

Tabla 3. Características del BSC

Tipo de mampuesto	f'_u	Tipo de mortero	Resistencia mín a compresión 28 d	f_1	f'_m
BSC	5,0 MPa	N	5,0 MPa	0,35	1,75 MPa

(Resultados obtenidos en la construcción del proyecto CRIATiC)

En construcciones de bajo compromiso estructural se pueden evitar los encadenados verticales que unen los arriostramientos horizontales. En lugar de ellos se pueden utilizar refuerzos dispuestos horizontalmente a nivel de antepecho y de dintel en la longitud del muro, para evitar la rotura por tracción que genera el esfuerzo de corte en dirección diagonal. También se recomienda la construcción de contrafuertes que limiten la longitud de cada paño permitiendo que se reduzca el ángulo de giro en los extremos verticales de cada paño, a fin de disminuir el riesgo por corte y por flexión lateral producto de las deformaciones.

A.2 Mampostería sin junta de asiento

El no uso de mezclas de unión entre mampuestos presenta múltiples ventajas que van desde lo estrictamente estructural hasta lo constructivo. En relación a la primera, se puede decir que en este sistema de uniones mecánicas se permite el movimiento diferencial relativo entre los mampuestos capaces de liberar la energía transmitida al muro desde el terreno durante la ocurrencia de acciones dinámicas, ya que cada elemento se comporta como un elemento disipador. Si bien en la mampostería con juntas esta situación ocurre cuando la misma abandona el comportamiento elástico por fisuración, justamente por la magnitud de las tensiones de adherencia entre mezclas y mampuestos, la ausencia de encastres mecánicos que eviten el desplazamiento lateral genera el colapso de los muros de toda la construcción en algunos casos.

fig. 2 Bloque articulado de suelo-cementocomprimido

En el CRIATiC, se estudiaron distintos modelos de BaTC (sistema Lamars), capaces de responder satisfactoriamente a las exigencias generadas por este tipo de acciones, diseñados cada uno de ellos para absorber las solicitaciones por corte y por compresión que eviten el desplome y caída del muro. Constructivamente, agiliza considerablemente la ejecución de estos cerramientos reduciendo costos de mano de obra y de materiales.

Las consideraciones de diseño constructivo de este tipo de muros son idénticas a las de las mamposterías con juntas, recomendando por ahora la vinculación entre arriostramientos horizontales y el confinamiento de cada paño con elementos internos o externos.

B. Muros monolíticos (tapial)

Este tipo de cerramientos obtenido por compactación del material en el mismo muro a medida que este se va construyendo. La técnica de ejecución se basa en el uso de moldes laterales a modo de encofrados donde el suelo es compactado en sucesivas capas de aproximadamente 20 cm de espesor hasta alcanzar la altura deseada. La tecnología a utilizar dependerá de las posibilidades existentes pudiendo resumirse a simples encofrados de madera donde el suelo es apisonado manualmente con pisones también de madera hasta el uso de encofrados deslizantes de aluminio en donde el material se introduce con máquinas y compactados con vibro compactador neumático.

fig 3. Molde tapial

A diferencia de los sistemas de mamposterías, la falta de juntas evita la existencia de planos potenciales de falla por corte diagonal, posibilitando un mejor comportamiento del muro a la vez que puedan alcanzarse idénticos valores de resistencia con menos costos (disminuye la cantidad de cemento utilizado en las dosificaciones). Estructuralmente, sabemos que en los sistemas de mamposterías la capacidad última de carga depende de la acción conjunta de mampuestos y morteros por los cual deben incrementarse los contenidos unitarios de cemento para alcanzar resistencia mínimas aceptables (aproximadamente 25 kg/cm^2).

Tabla 4 – Valores promedios

Resistencia a compresión	Resistencia a flexión	Resistencia a corte
9.03 MPa	1.51MPa	1.06 MPa

(Resultados obtenidos en la construcción del proyecto CRIATiC)

fig. 4 Juntas verticales (tipo macho-hembra) dispuestas en los bordes del tercio medio de la longitud del muro

Con respecto a los criterios generales de diseños se recomienda el uso de encadenados inferior y superior para compatibilizar las deformaciones a nivel de coronamiento evitando desplazamientos diferenciales que conduzcan al colapso del muro o a la caída del techo.

Paralelamente se pueden disponer de armaduras verticales separadas cada 60 a 80 cm, vinculando los elementos de arrriostramientos horizontales superior e inferior, mejorando la resistencia a flexión lateral con mayor control de deformaciones por acción de cargas laterales. En la resolución constructiva del proyecto CRIATiC se aplicó esta solución en la ejecución de la torre de servicio con excelentes resultados (memoria V SIACOT).

IV.2 Cerramientos horizontales

El uso de suelo cemento encuentra su principal aplicación en la materialización de cerramientos verticales, muros. Sin embargo, las bondades que este material ofrece desde el aspecto tecnológico, permite su adopción en la resolución de elementos constructivos horizontales.
Basándonos en las propiedades mecánicas, fundamentalmente, la resistencia a compresión es posible utilizar el BCS como componente básico para la construcción de cúpulas o de bóvedas de cañón corrido, donde la traza del arco asegure esfuerzos de compresión pura.

fig. 5 Construcción bóveda

V. CONCLUSIONES

El suelo-cemento estudiado con rigor técnico-científico mediante análisis físicos, químicos, mecánicos, estructurales y, aplicado con técnicas y sistemas constructivos apropiados es un material que ofrece posibilidades ciertas de obtener un producto final -el edificio- estructuralmente confiable.

Una correcta identificación y clasificación de la tierra empleada, posibilita optimizar las mezclas de suelo-cemento para alcanzar una eficiente estabilización con lo que se logra mejorar las propiedades finales de los componentes: aumentar la resistencia final a rotura por compresión y por corte; reducir la absorción de agua (máx. 16%); mejorar la terminación superficial, etc.

Referida a la tecnología de construcción con tierra en áreas sísmicas, la realidad existente en la Argentina, es que más de la mitad de la población residente en zonas áridas que presentan de moderado a elevado riesgo sísmico (alrededor del 75% del territorio) sigue construyendo sin contar con asistencia técnica adecuada. Un posible camino que lleve al mejoramiento de esta situación es, por una parte, el trabajo sistemático en la educación y en la formación de recursos humanos en diversos campos y niveles y, por otra, desarrollar y experimentar sistemas y componentes constructivos ajustados al rigor técnico-científico exigido para los sistemas convencionales.

VI. BIBLIOGRAFÍA

-PROYECTO DE REGLAMENTO CIRSOC 501. Reglamento argentino de estructuras de mamposterías. INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Buenos Aires, Argentina.2005. (Proyecto en discusión pública).
-PROYECTO DE REGLAMENTO CIRSOC 501-E. Reglamento empírico para construcciones de mamposterías de bajo compromiso estructural. INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Buenos Aires, Argentina.2005. (Proyecto en discusión pública).
-ARIAS, Lucía E; ALDERETE, Carlos E; MELLACE, Rafael F. 2004. Variación de la resistencia del BTC según distintos estados hídricos. En: Libro de Memorias III Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (II SIACOT). Tucumán, Argentina. págs: 235-244.
-ALDERETE, Carlos E; ARIAS, Lucía E; MELLACE, Rafael F. 2004. Optimización de mezclas de suelo-cemento. En: CD de Memorias III Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (II SIACOT). Tucumán, Argentina.
- MELLACE, Rafael; ROTONDARO, Rodolfo; SOSA, Mirta; LATINA, Stella; ARIAS, Lucía; ALDERETE, Carlos. 2003. Mejoras de bajo costo para muros de tierra cruda – Tucumán-Argentina – Etapa II: Construcción y monitoreo de prototipos. Edición LEME – FAU/UNT. Serie: Arquitectura de Tierra Cruda. Tucumán, Argentina..
- MELLACE, Rafael; ROTONDARO, Rodolfo; SOSA, Mirta; LATINA, Stella; ARIAS, Lucía; ALDERETE, Carlos. 2003. Mejoras de bajo costo para muros de tierra cruda – Tucumán-Argentina -Etapa I: diseño y ensayos previos. Edición LEME – FAU/UNT. Serie: Arquitectura de Tierra Cruda. Tucumán, Argentina.
-ARIAS, Lucía E; ALDERETE, Carlos E; MELLACE, Rafael F. 2002. Mampostería de bloque comprimidos de tierra-cemento con junta de asiento. Edición LEME. Serie: Componentes constructivos de la envolvente (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina.
-ALDERETE, Carlos E; ARIAS, Lucía E; MELLACE, Rafael F. 2002. Control de la absorción en bloques comprimidos de suelo-cemento. Edición LEME. Serie: “Componentes constructivos de la envolvente” (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina.
- MELLACE, Rafael F; ALDERETE, Carlos E.; ARIAS, Lucía E. 2002. Centro Regional de Investigaciones de Tierra Cruda: Sistema Constructivo LAMARS. I Seminario Iberoamericano de Construcción con Tierra (I SIACOT). Salvador- Bahía- Brasil,.
-ARIAS, Lucía E; ALDERETE, Carlos E; MELLACE, Rafael F. 2001. Análisis sismorresistente - Proyecto CRITIC (Parte I): Mampostería de bloque comprimido de tierra-cemento. Edición LEME – FAU/UNT. Serie: Componentes constructivos de la envolvente (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina.
- REGLAMENTO INPRES-CIRSOC 103. Normas Argentinas para construcciones sismorresistentes, Parte III-Construcciones de mamposterías. INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Buenos Aires, Argentina.1998
-MELLACE, Rafael F; ALDERETE, Carlos E. 1996. Ensayos físico-mecánicos de suelo y componentes constructivos de tierra cruda. Salón de Fiestas K-Sama - Santa María, Catamarca. Edición LEME. Serie: “Componentes constructivos de la envolvente” (ISSN: 0328-3240). Tucumán, Argentina.
-GALLEGOS, Héctor. 1989 .Albañilería Estructural. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial. 2ª Edición corregida y aumentada.