

6.a. PROPUESTAS CONSTRUCTIVAS SOSTENIBLES. EL TERRENO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN DE ELEMENTOS MURARIOS MEDIANTE EL USO DEL BTC

Pedro Olmos, Dr. Arquitecto
Francisco Vera, Arquitecto
Alejandro Mendoza, Egresado.
Andrea Intriago, Egresada.

Universidad de Valladolid, UVA. España.
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, ULEAM. Ecuador.

1.INTRODUCCIÓN

Desde los primeros tiempos el hombre se adapta y utiliza el terreno con diversos fines, y quizás los más importantes han sido procurarse protección y cobijo. Así utiliza las oquedades y cuevas naturales, descubre que realizando excavaciones en determinados terrenos con ciertas formas consigue construir una cueva-vivienda, o amontonando y compactando el terreno llega a formar un muro que le procura defensa y protección frente animales u otros hombres.

Si damos un gran salto en el tiempo y nos situamos en la actualidad vemos que las cosas no han cambiado mucho. Se sigue utilizando el material térreo tanto en la Arquitectura como en la Ingeniería Civil en algunos tipos de obras y entre otras podemos citar:

- Las viviendas y construcciones arquitectónicas con empleo de tierra cruda, mediante el empleo de adobes, tapiales, bloques de tierra comprimida (BTC)
- Los terraplenes de urbanizaciones y carreteras
- Los rellenos de zanjas
- Los muros de tierra armada, suelo reforzado, rellenos de trasdós de muros...
- Las capas granulares de firmes de carreteras
- Las presas de materiales sueltos

En estas obras de tierra el suelo se contempla como un elemento constructivo sometido a una serie de acciones para las cuales debemos diseñarlas. Y como parte constitutiva de la propia obra de tierra, al material térreo debemos exigir una serie de especificaciones técnicas que nos garanticen un comportamiento adecuado.

En lo que respecta a la Arquitectura, la tradición de la Arquitectura con tierra ha sobrevivido hasta nuestros tiempos, si bien en muchos casos limitada a un cierto entorno asociado a la pobreza.

Uno de los objetivos planteados en los trabajos de investigación que llevamos a cabo es la dignificación del material tierra y su integración dentro de una propuesta constructiva sostenible, con el objeto de incorporar la técnica constructiva de los bloques de tierra comprimida (BTC) en la construcción de elementos murarios e incorporarlos a un prototipo de vivienda social que se propone y que se está ensayando.

Podemos definir el BTC como una pieza a emplear en la construcción de fábricas murarias con forma de paralelepípedo rectangular, obtenida por compresión estática o dinámica de tierra húmeda, seguida de un desmolde inmediato y un posterior curado, y que eventualmente puede contener estabilizantes o aditivos con objeto de obtener o alcanzar unas características determinadas.

El fin último de nuestra intervención es demostrar la idoneidad del material para su uso, con objeto de que pueda ser incorporado en los programas de vivienda social de la región de Manabí (Ecuador), estableciendo para ello un protocolo de fabricación y control del material a lo largo de todo el proceso.

2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL SUELO

De la definición dada del BTC se desprende que su materia prima es la tierra mojada. Pero esta tierra no puede ser cualquiera, debe ser un suelo seleccionado, por lo que vamos a iniciar el estudio con la caracterización de los suelos, con objeto de conocer aquellas propiedades que nos van a permitir establecer dicha selección.

Para realizar la caracterización vamos a partir del análisis de los suelos en función de su estructura y del tamaño de sus partículas, lo que nos permitirá establecer una clasificación de los mismos en función de su composición y de las propiedades de sus partículas.

La estructura física de los suelos está constituida a base de partículas sólidas o granos que constituyen el esqueleto mineral resistente del mismo y de una serie de huecos entre las partículas que pueden contener aire, agua o ambas cosas. Algunos autores definen al suelo como un material en el que coexisten las tres fases: sólida (partículas), líquida (agua) y gaseosa (aire).

2.1. Clasificación de los suelos

Las partículas de los suelos en función de su tamaño desarrollan un tipo distinto de estructura que permiten diferenciar el comportamiento de los suelos en dos grandes grupos: suelos de grano grueso o granulares, y suelos de grano fino o cohesivos (la cohesión es una fuerza de atracción entre las partículas). En la tabla adjunta se indican las principales características de cada uno de estos dos tipos

CARACTERÍSTICAS	SUELOS DE GRANO GRUESO	SUELOS DE GRANO FINO
IDENTIFICACIÓN	TAMAÑO PARTÍCULAS	PROPIEDADES DEPENDIENTES DE LA HUMEDAD • COHESIÓN • PLASTICIDAD
TAMAÑO PARTÍCULAS	> 0,06 mm.	< 0,06 mm.
ESTRUCTURA	SIMPLE	FLOCULADA, DISPERSA
FUERZAS INTERNAS	ROZAMIENTO	ROZAMIENTO, COHESIÓN
SUELOS QUE LOS FORMAN	GRAVAS, ARENAS	LIMOS, ARCILLAS
DENOMINACIÓN GENÉRICA	SUELOS GRANULARES	SUELOS COHESIVOS

Como vemos en la tabla el tamaño crítico de división de los suelos de grano grueso y fino es 0,06 mm.

Los suelos de grano grueso están constituidos por partículas con una estructura simple, entendiendo por tal a la formada por partículas de forma sensiblemente esféricas puestas en contacto unas con otras y sometidas únicamente a las fuerzas de rozamiento entre partículas.

Los suelos de grano fino están formados por partículas alargadas en forma de hoja o aguja constituyendo estructuras muy abiertas debido a que a las fuerzas de rozamiento se suman otras fuerzas internas que denominamos cohesivas, conformando otros tipos de estructuras, las floculadas y las dispersas, en las que entran en juego enlaces electrostáticos. Una de las consecuencias más importantes es que estos suelos presentan una propiedad que denominamos plasticidad (capacidad de deformación sin rotura).

Existen distintas clasificaciones de suelos, la estadounidense ASTM, las europeas DIN y UNE. Hoy día se ha consolidado en España la clasificación UNE que establece la clasificación utilizando una progresión geométrica con los números 2 y 6.

COHESIVO (GRANO FINO)				GRANULAR (GRANO GRUESO)						
ARCILLA	LIMO			ARENA			GRAVA			BOLOS
	FINO	MEDIO	GRUESO	FINA	MEDIA	GRUESA	FINA	MEDIA	GRUESA	
		0,006	0,02		0,2	0,6		6	20	
	0,002			0,06			2,0			60
										mm

El nombre de un suelo se designa por el del tamaño predominante de sus partículas. En los suelos en los que no predomina claramente un tamaño se denominan con dos o más nombres, utilizando los secundarios de forma adjetiva: arena arcillosa, limo arenoso, etc...

2.2. Clasificación de los suelos de grano grueso

Para su clasificación se utiliza el análisis granulométrico, que es una división porcentual en peso de sus partículas en función del tamaño de las mismas.

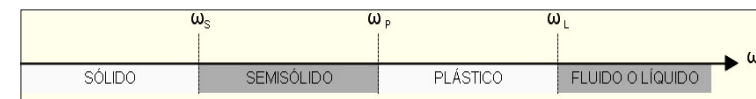
El método utilizado es el conocido como método del tamizado, que consiste en pasar una cantidad de suelo seco, desmenuzado, por una serie de tamices hasta el tamiz 0,080 UNE o el 200 ASTM (0,074 mm). Se obtiene el peso retenido en cada tamiz y el que pasa por el tamiz final (lo que se conoce como rechazo y que constituyen los finos, limos y arcillas, del suelo analizado).

El ensayo está regulado en España por la norma UNE 103-101, y su resultado es una curva granulométrica en la que se representa gráficamente en un diagrama a escala natural el % de suelo que pasa por cada tamiz y a escala logarítmica el tamaño de las partículas.

2.3. Clasificación de los suelos de grano fino

Para su clasificación utilizamos una peculiaridad de dichos suelos, su consistencia, que depende de su grado de humedad.

Partiendo de este hecho Atterberg definió unos límites que permiten establecer la transición de los distintos estados del suelo (de mayor a menor humedad): líquido o fluido, plástico, semisólido y sólido.



Para la clasificación de los suelos de grano fino se utilizan los límites líquido y plástico y un ábaco ideado por Casagrande.

El límite líquido (ω_L) se define como la humedad del suelo en su tránsito del estado fluido al plástico. Para su determinación se utiliza el método conocido como de la Cuchara de Casagrande (UNE-103-103-94). Consiste en amasar un suelo que pase por el tamiz 4 UNE. Su humedad se corresponderá con el límite líquido si colocado en la cuchara y una vez ranurado con el acanalador, cierra en el fondo de la cuchara 13 mm tras 25 golpes.

Como conseguir el cierre a los 25 golpes es casi imposible, para obtener el valor del límite líquido se hacen dos determinaciones, una que cierre entre 25 y 40 golpes y otra entre 25 y 10 golpes, determinándose ω_L de forma estadística, encajando una recta patrón entre las determinaciones realizadas en un impreso a escala logarítmica.

El límite plástico (ω_P) se define como la humedad del suelo en su tránsito del estado plástico al semisólido. Se caracteriza porque el suelo pierde su plasticidad y empieza a cuartearse. Se determina obteniendo la humedad de una muestra de suelo (que pasa por el tamiz 4 UNE) que es amasada por enrollamiento, hasta conseguir un cilindro de unos 3 mm. de diámetro que se disgrega en trozos de 0,5 a 5 cm de longitud (UNE-103-104-93).



Figura 01.

Asociado a estos límites se encuentra el índice de plasticidad (IP) que se define como la diferencia entre el límite líquido y el plástico, y que nos marca el rango en el que el suelo permanece en estado plástico.

$$I_P = \omega_L - \omega_P$$

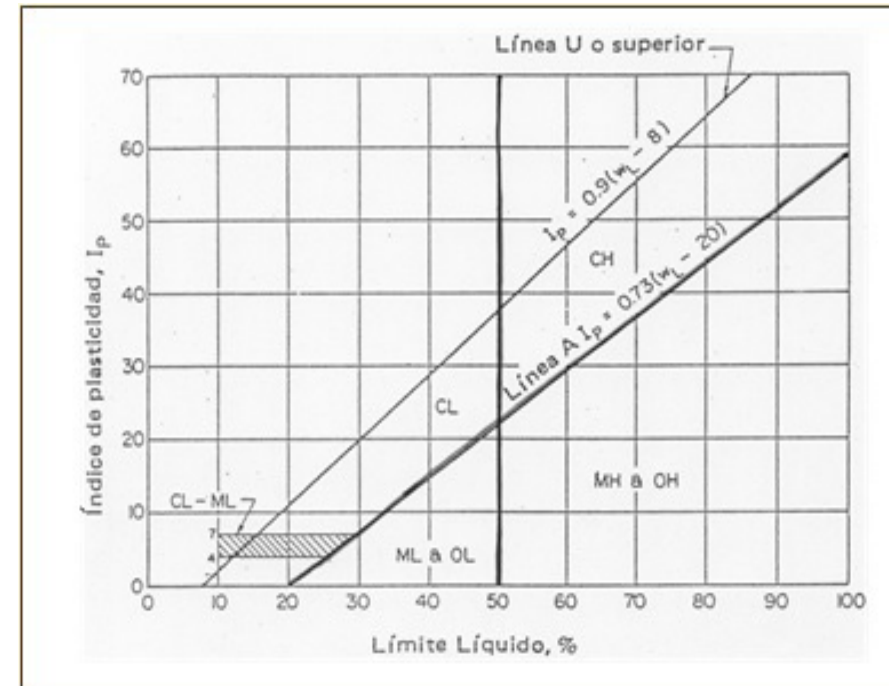
Para clasificar los suelos de grano fino Casagrande ideó un método basado en los valores de los límites líquido y plástico del suelo. Representó en un ábaco el límite líquido en abscisas y el índice de plasticidad en ordenadas. El resultado fue que los suelos de naturaleza arcillosa se situaban siempre por encima de una línea que denominó línea A, y los suelos de naturaleza orgánica y limos por debajo de dicha línea. Así mismo encontró que por encima de otra línea (U o superior) no existían suelos.

Por otro lado fijó el valor del límite líquido igual a 50, para diferenciar los suelos de mayor o menor plasticidad, y asignó una

simbología (iniciales del nombre en inglés) a los distintos tipos de suelo:

- C = Arcillas
- M = Limos
- O = Suelos orgánicos
- H = Alta plasticidad
- L = Baja plasticidad

Denominando a los suelos de la forma que se indica en el ábaco:



3. ANÁLISIS Y CONTROL DE LOS MATERIALES CONSTITUTIVOS DEL BTC.

3.1. Recomendaciones propuestas a los materiales de BTC

Como norma de referencia partimos de la norma española UNE 41410:20081. Entre las prescripciones que señala al material constitutivo de los BTC destacamos las siguientes:

La tierra destinada a la construcción de los BTC está compuesta esencialmente por grava, arena, limo y arcilla, mezclado con agua y, opcionalmente con estabilizantes y aditivos.

Deben rechazarse las tierras que contengan:

- Materia orgánica en cantidad mayor o igual al 2%.
- Sales solubles en contenido mayor del 2%

Las principales características de la tierra se definen por:

- La granulometría
- La plasticidad
- El tipo de arcilla

Se recomienda que la granulometría del material utilizado esté inscrita en un determinado huso granulométrico.

No se admitirán aquellas tierras con un contenido en arcillas menor al 10%.

Se recomienda que la plasticidad del material esté comprendida preferentemente en una cierta zona del diagrama de plasticidad. Los límites recomendados son aproximados. Los materiales cuya plasticidad queda inscrita en la zona sombreada recomendada, en la mayoría de los casos, dan resultados satisfactorios.

Se limita el uso de los aditivos y/o estabilizantes al 15% de la

masa seca del BTC. Los productos habitualmente usados son cemento, cal o yeso.

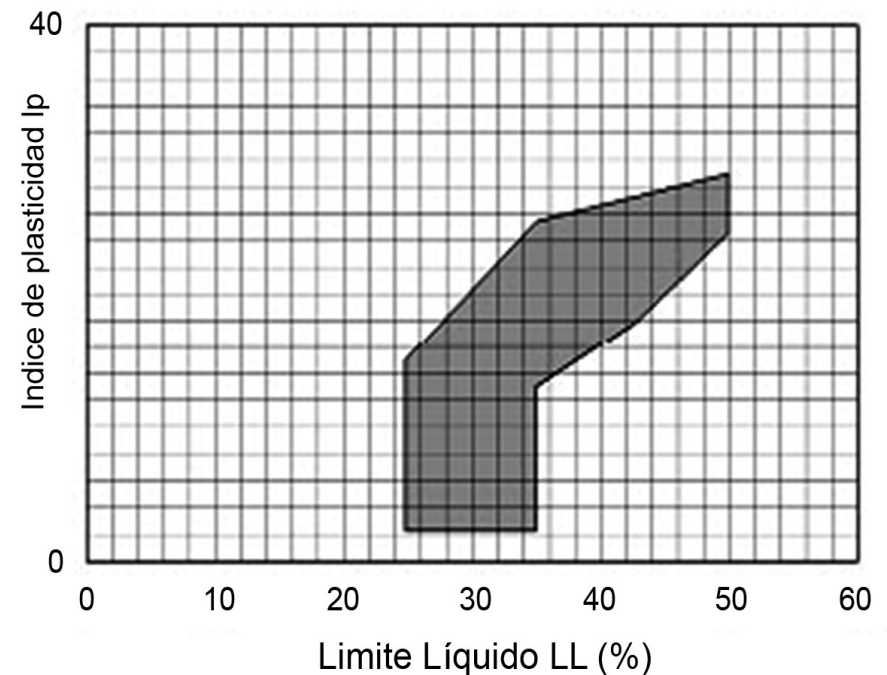
Partiendo de estas prescripciones establecemos unas recomendaciones particulares con objeto de que nos permitan elegir el material más adecuado dentro de las posibilidades que nos ofrecen los terrenos de la zona de estudio.

Dentro de las especificaciones granulométricas, las recomendaciones consideradas son:

- Delimitación del tamaño máximo de las partículas a 20mm.

HUSO GRANULOMÉTRICO	ABERTURA DE LOS TAMICES UNE-EN 933-2 (mm)						
	20	10	5	2	0,63	0,2	0,08
PORCENTAJES RECOMENDADOS	100	78-100	68-100	54-100	40-100	30-74	24-88

Tabla 01. Huso granulométrico de la fracción gruesa recomendado



Ábaco 01. Zona recomendada del diagrama de plasticidad de las tierras



Figura 02. Vista desde satélite de los emplazamientos de la Zona Rural del Cantón Manta y distancias desde el sitio de recolección de las muestras hasta el laboratorio de la ULEAM. (Fuente Google Earth.)

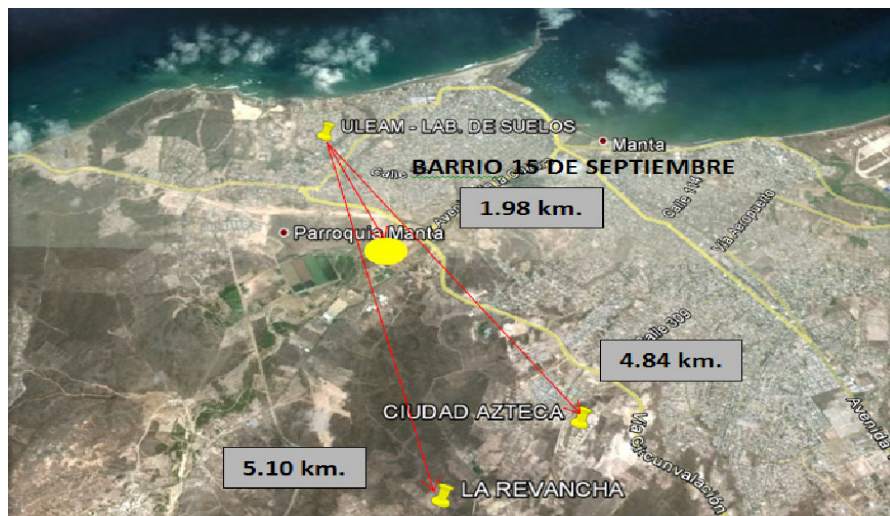


Figura 03. Vista desde satélite de los emplazamientos de la Zona Urbana del Cantón Manta y distancias desde el sitio de recolección de las muestras hasta el laboratorio de la ULEAM. (Fuente Google Earth)

- Porcentaje mínimo de finos, que habitualmente se toma igual a la fracción que pasa por el tamiz 0,08 mm del 24%.

1.- Norma UNE 41410:2008 Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo

- Porcentaje máximo de finos, referidos también a la fracción que pasa por el tamiz 0,08 mm del 68%.
- Adaptación de la curva granulométrica al huso granulométrico de la Tabla 1

Las especificaciones plásticas que se incluyen se consideran de obligado cumplimiento, dado que es la única forma que se dispone de garantizar una plasticidad adecuada. Estas limitaciones se refieren tanto a garantizar una cohesión mínima como a evitar posibles fenómenos de hinchamiento por elevada plasticidad. Para ello adoptamos la propuesta de plasticidad de la norma UNE 41410:2008, que se reproduce en el Ábaco 1.

3.2. Proceso de selección del material terreno

El primero de los trabajos ha consistido en la búsqueda de distintos emplazamientos en el entorno del lugar de experimentación, la ciudad de Manta, procediéndose para ello a documentar el lugar mediante planimetría y fotografías del mismo, indicando su forma de acceso, la distancia al centro de experimentación, forma de recogida y carga del material, etc.

De cada emplazamiento se han obtenido muestras de material térreo que se han transportado hasta el Laboratorio de construcción de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM) con objeto de realizar ensayos de identificación. Concretamente los ensayos a los que se han sometido las muestras han sido:

- Análisis granulométrico
- Límite líquido
- Límite plástico

Dadas las características climatológicas de Manta, se han delimitado dos zonas, una zona que hemos denominado rural caracterizada por su clima tropical húmedo, y otra que hemos denominado zona urbana cuyo clima es tropical seco. En las Figuras 2 y 3 se muestran las localizaciones elegidas dentro de cada zona.

Los valores medios de los ensayos granulométricos realizados con las muestras ensayadas de los distintos emplazamientos se muestran en la Tabla 2.

Se observa que las curvas granulométricas de todos los terrenos se salen del huso granulométrico recomendado, siendo suelos con un porcentaje muy elevado en finos, a excepción de uno de los resultados que invierte los porcentajes e incumple el mínimo de finos recomendado.

Los límites de plasticidad obtenidos permiten clasificar los suelos en el ábaco de Casagrande y también comprobar si se encuentran dentro de la zona recomendada por la norma UNE 41410:2008.

Desechada la zona urbana, se han analizado las muestras M1, M3 y M4 y en ambos casos los suelos se clasifican con la denominación ML, siendo unos limos arcillosos de baja plasticidad con muy poca arena. El exceso en finos, al ser de naturaleza limosa, no parece que presenten un problema de plasticidad dado que esta es más bien baja y por ello el suelo seguramente tenga una baja cohesión, razón por la cual se presume sea necesaria la adición de cal o cemento.

De los distintos suelos se seleccionó la muestra M4, correspondiente a la Cantera Vipa (El Aromo), por encontrarse dentro del rango de plasticidad recomendado por la norma y reunir adicionalmente otras ventajas, como ser por su procedencia de cantera, un terreno homogéneo de fácil extracción, carga y transporte así como por su proximidad al lugar de empleo.

MUESTRA ENSAYADA	COTA RECOGIDA	% GRAVA	% ARENA	% FINOS
ZONA RURAL				
M1: Centro del Aromo	-0.4	0.00	11.52	88.48
M2: Finca Familia Camino	-0.4	0.00	9.37	90.27
M3: Finca Familia Camino	-0.2	0.27	7.26	90.50
M4: Cantera Vipa	-0.4	0.07	10.30	89.63
ZONA URBANA				
M5: Ciudad Azteca	-0.4	0.11	15.83	84.06
M6 Ciudad Azteca	-0.3	0.45	85.25	14.30
M7: Zona la Revancha	-0.2	0.06	22.46	77.48

Tabla 02. Resultados que reflejan los porcentajes de composición de los suelos seleccionados obtenidos en el laboratorio de la ULEAM

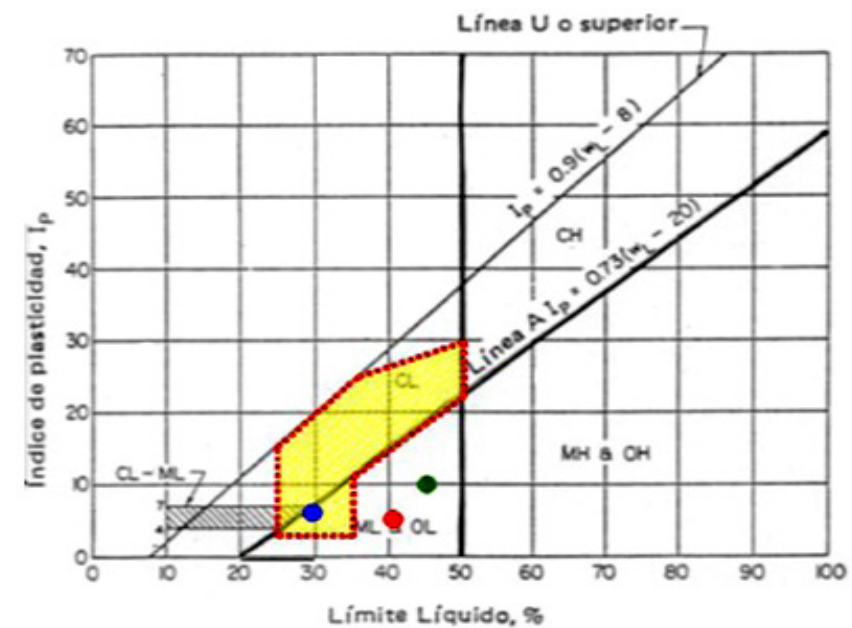


Figura 04. Propuesta de plasticidad Abaco de Casagrande (Fuente, Norma UNE-41410:2008)



Figura 05. Máquina CINVA - RAM



Figura 06. Prensa para el ensayo de compresión simple y tanque de inmersión para la ejecución de ensayo húmedo. (Fuente Alejandro Mendoza – Andrea Intriago)



4. EJECUCIÓN Y CONTROL DE LOS BTC

Al intentar realizar bloques con el material seleccionado, se vio la necesidad de adicionar un ligante, como ya habíamos presupuesto al realizar su identificación, por lo que se procedió a estudiar distintas dosificaciones de cal y cemento para analizar cual resultaba ser la más favorable.

Haciendo un poco de historia, sabemos que el BTC, fue desarrollado en la década de 1950 en Colombia, como un producto de investigación del Centro Interamericano de la Vivienda (CINVA) para producir materiales de construcción de bajo costo. De esta investigación nació la prensa CINVA-RAM, nominada así por las siglas de dicho centro de investigación y por el apellido del fabricante, Raúl Ramírez. Desde los años 80 ha tenido gran difusión en todo el mundo, y es el modelo de prensa utilizado en nuestra investigación.

Para controlar la dosificación y el tiempo de ejecución de los bloques, se estableció como unidad de trabajo (que denominamos “parada”) la ejecución de 5 bloques.

Las medidas de los bloques son 29x14x10cm, por lo que una parada equivale a la utilización de 0,0203 m³ de tierra.

El volumen de agua utilizado por parada osciló entre 3,5 y 4 litros, en función de la humedad natural de la tierra acopiada, lo que equivale a una dosificación de 170 a 190 l/m³.

La dosificación de aditivos se fue analizando a partir del 5%, en función de su consistencia una vez amasado, alcanzándose como valores óptimos el 9% para el cemento Portland y el 11% para la cal, valores asumibles ya que están por debajo de la limitación del 15% que impone la norma española UNE 41410:2008 y que adoptamos como límite.

Durante la ejecución de los bloques se observó que era conveniente golpear el material con un puntal durante su llenado, debiéndolo hacer con mayor intensidad en las equinas, así como proceder a la compactación en dos etapas.

Los rendimientos alcanzados fueron de 15 minutos por parada, estando formado el equipo de ejecución por tres estudiantes.

Tras siete días de curado, se realizaron ensayos de compresión simple en el Laboratorio de construcción de la Facultad de Ingeniería Civil de la ULEAM.

Se ensayaron muestras secas y húmedas, estas últimas introduciendo 2 cm de una cara del bloque durante 1 hora en el tanque de inmersión. Los ensayos se realizaron en posición tabla o echados y en posición vertical. En todos los casos los resultados de los bloques tierra-cemento resultaron ser muy superiores, tanto con bloque seco como mojado. Los resultados de los ensayos de bloques secos se muestran en la Tabla 3.

De acuerdo con los ensayos de compresión seca realizados, nos pudimos dar cuenta que los bloques con mayor resistencia son los de tierra cemento (posición en tabla o echados), seguidos por los de tierra cal, mientras que con los de tierra sin aditivos no fue factible realizar el ensayo. Se ha obtenido como resistencia más alta a los 7 días la de 54.31 kg/cm² para el bloque de tierra cemento (posición de tabla o echado). Los resultados a los 21 días confirman la elección. Como dato curioso se observa el incremento relativo de resistencia alcanzado por los bloques de tierra-cal con el tiempo.

5. EJECUCIÓN DE LAS FÁBRICAS DE BTC DEL PROTOTIPO

Se eligió un terreno disponible en el Aromo para la ejecución de un prototipo, realizando la ejecución de los bloques y la construcción de cimientos y fábricas alumnos de la ULEAM.

Para la construcción de los muros se han utilizado bloques de tierra-cemento, macizos y con huecos, estos últimos permiten la colocación de armaduras para arriostrar las fábricas.

Los bloques de BTC empleados se ensayaron a distintas fechas que oscilaron de los 7 a los 43 días. Así mismo se realizó la rotura de un ladrillo ordinario, con objeto de tener un dato comparativo, resultando que los BTC mostraron tener una resistencia muy superior.

MUESTRA ROTURA A LOS 7 DÍAS		ROTURA A COMPRESIÓN DE BLOQUES		
TIPO BLOQUE	DIMENSIONES	FECHA	SECCION	RESISTENCIA
BLOQUE TIERRA	29x14 cm	05/03/2012	406 cm ²	
BLOQUE TIERRA - CAL	29x14 cm	09/03/2012	406 cm ²	22,66 kg/cm ²
BLOQUE TIERRA - CAL	29x10 cm	09/03/2012	290 cm ²	27,59 kg/cm ²
BLOQUE TIERRA - CEMENTO	29x14 cm	09/03/2012	406 cm ²	54,31 kg/cm ²

MUESTRA ROTURA A LOS 21 DÍAS		ROTURA A COMPRESIÓN DE BLOQUES		
TIPO BLOQUE	DIMENSIONES	FECHA	SECCION	RESISTENCIA
BLOQUE TIERRA	29x14 cm	19/03/2012	406 cm ²	32,72 kg/cm ²
BLOQUE TIERRA - CAL	29x14 cm	23/03/2012	406 cm ²	61,57 kg/cm ²
BLOQUE TIERRA - CEMENTO	29x10 cm	23/03/2012	290 cm ²	71,42 kg/cm ²

Tabla 03. Pruebas de compresión simple- Laboratorio de la ULEAM (Fuente Alejandro Mendoza – Andrea Intriago)



Figura 07. Prototipo de vivienda social – Sitio el Aromo. Inicio de su ejecución (Fuente Grupo de Investigación AECID – ULEAM - UVA)



Figura 08. Prototipo de vivienda social – Sitio el Aromo. Inicio de su ejecución (Fuente Grupo de Investigación AECID – ULEAM - UVa)



Figura 09. Prototipo de vivienda social – Sitio el Aromo. Inicio de su ejecución (Fuente Grupo de Investigación AECID – ULEAM - UVa)

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA	ROTURA A COMPRESIÓN DE BLOQUES						
	DIMENSIONES	FECHA DE MOLDEO	FECHA DE ROTURA	TIEMPO DE CURADO	SECCIÓN (cm²)	CARGA Y COMPRESIÓN SIMPLE	RESISTENCIA kg/cm²
Bloque tierra - cemento (Macizo)	29x14 cm	09/07/2012	21/08/2012	43 días	408	32,000	78,82
Bloque tierra - cemento (Macizo)	29x14 cm	18/07/2012	21/08/2012	34 días	408	25,500	62,81
Bloque tierra - cemento (con huecos)	29x14 cm	14/08/2012	21/08/2012	7 días	408	17,000	41,87
Bloque tierra - cemento (con huecos)	29x14 cm	07/08/2012	21/08/2012	14 días	408	22,000	54,18
Ladrillo	26x14 cm	07/08/2012	21/08/2012	14 días	354	8,000	23,12

Tabla 04. Pruebas de compresión simple a los BTC del prototipo y a ladrillos- Laboratorio de la ULEAM (Fuente Francisco Vera - Alejandro Mendoza – Andrea Intriago)