

PROGRAMA INTERLABORATORIAL PROTERRA: ENSAYOS DE BTC

Santiago Cabrera¹, Mayara Tartarotti Cardozo da Silva²

¹Investigador, Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Argentina, spcabrera@outlook.com

²Estudiante de Maestría en Eficiencia Energética y Sustentabilidad, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil, mayaratartarotti@gmail.com

Palabras clave: Resistencia a compresión, análisis estadístico, bloque de tierra comprimida

RESUMEN

Durante el año 2022 siete laboratorios de Argentina, Brasil y México realizaron una actividad interlaboratorial de BTC (bloque de tierra comprimida) cuyo principal objetivo consistió en evaluar la variabilidad entre la resistencia media a compresión determinada sobre diferentes geometrías de probetas, cada una de ellas confeccionada en función de las recomendaciones de las diferentes normas específicas para BTC de cada país. Cada laboratorio, tras realizar ensayos de caracterización del suelo disponible, confeccionó 30 BTC, los cuales fueron divididos en cuatro series sobre las cuales se determinó su resistencia a compresión no confinada. Se determinó luego la resistencia media a compresión de cada serie y se efectuó un análisis estadístico de los resultados obtenidos por cada laboratorio. Los resultados confirman que para BTC producidos con los mismos materiales, la geometría de las probetas ensayadas modifica su resistencia media a compresión, no siendo válida la comparación de resistencias obtenidas tras la realización de ensayos sobre diferentes tipos de probetas. Se advierte además una diferencia significativa entre las resistencias a compresión de los BTC producidos por los diferentes laboratorios, variando estas de 0.8 a 5 MPa.

1 INTRODUCCIÓN

En el año 2008 la Red PROTERRA presentó en el “VII Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra” los resultados de la primera etapa del Programa Interlaboratorial de PROTERRA, cuyo objetivo fue definir procedimientos para ensayos sobre adobes y definir parámetros de control a partir de los resultados obtenidos en ensayos realizados por diferentes laboratorios que integran la Red (Neves; Faria, 2008).

En la Asamblea del año 2019 de la Red PROTERRA se propone continuar con esta línea de trabajo, proponiendo una nueva actividad interlaboratorial que fortalezca el vínculo entre las diferentes instituciones y personas que integran la Red; pero esta vez abocada al estudio de los métodos de ensayo empleados para determinar la resistencia a compresión no confinada de bloques de tierra comprimida (BTC).

1.1 Marco normativo

Numerosos países cuentan hoy con normas técnicas específicas para la construcción con tierra; sin embargo, no todos poseen normas de ensayo específicas para BTC publicadas por organismos oficiales de normalización.

La norma brasileña NBR 8492 para “ladrillos de suelo cemento” (ABNT, 2012) evalúa únicamente la resistencia a compresión saturada de los bloques, estipulando que la resistencia media a compresión de siete probetas debe ser igual o mayor a 2 MPa. Cada probeta se confecciona partiendo un BTC en dos y asentando ambas mitades con pasta de cemento de 3 mm de espesor. Esta norma establece además que el encabezado de las probetas es opcional, y de optar por realizarlo, debe efectuarse con pasta de cemento de 3 mm de espesor o simplemente “raspando” con espátula las imperfecciones de las caras superior e inferior de la probeta. Asimismo, la norma brasilera NBR 10836 para “bloques de

suelo cemento" (ABNT, 2013) proponen realizar el mismo ensayo, pero empleando un bloque entero (también saturado) como probeta.

La norma india IS 1725 (IS, 2013), al igual que las brasileñas evalúa únicamente la resistencia a compresión de bloques saturados, estableciendo que la resistencia media mínima para BTC portantes y no portantes debe ser de 2 y 3.5 MPa, respectivamente. El ensayo se realiza directamente sobre bloques enteros en posición horizontal, encabezados con placas de madera contrachapada o yeso.

La norma francesa XP P 13-901 (AFNOR, 2017) y la colombiana NTC 5324 (ICONTEC, 2005) evalúan la resistencia a compresión seca y saturada de los BTC estableciendo diferentes niveles de resistencia característica (no media) en virtud de la función que cumplan: 2, 4 y 6 MPa para probetas completamente secas; 1, 2 y 3 MPa para probetas saturadas. La preparación de las probetas es idéntica a la estipulada por la norma brasileña, y permite emplear para su encabezado, además de pasta de cemento de 3 mm de espesor, hojas de cartón y madera contrachapada del mismo espesor, recomendando explícitamente no emplear placas de neopreno.

La norma estadounidense del Estado de Nuevo México (NMAC, 2009) determinan la resistencia a compresión sobre bloques enteros y en posición horizontal, tanto secos como saturados, estableciendo valores mínimos para ambas resistencias, pero nada sobre el encabezado de los bloques.

La normativa neozelandesa NZS 4298 (SNZ, 1998) es la única que, además de ensayar al BTC entero y en posición horizontal, propone ensayarlo entero de manera vertical (siempre y cuando sea macizo), estipulando como límite inferior una resistencia a compresión de 3.6 MPa para el ensayo en posición horizontal y 2,0 MPa para la posición vertical; establece además que el ensayo debe realizarse con los bloques completamente secos, y nada dice sobre su encabezado.

La norma mexicana NMX-C-508 (ONNCCE, 2015) y la española UNE EN 41410 (AENOR, 2008) evalúan la resistencia de los BTC sobre bloques enteros, secos y ensayados en posición horizontal, y recomiendan encabezar las probetas sólo si resultase estrictamente necesario y no alcanzase con desgastar las irregularidades. Si se optase por encabezar las probetas, la norma mexicana establece emplear un mortero de azufre y grafito de alta resistencia mientras que la española no estipula el material del mortero a emplear. Ambas normas establecen además tres niveles de resistencia característica que deben respetar los BTC en virtud de la función que desempeñen. Es importante mencionar que la norma española es la única que permite evaluar la resistencia a compresión sobre medio BTC.

A pesar de no ser una norma publicada por algún organismo nacional de normalización, deben mencionarse las recomendaciones realizadas en 1997 por el RILEM Technical Committees (Olivier et al., 1997) para evaluar la resistencia a compresión de los BTC, dada la gran jerarquía de este comité internacional. Según este comité, para determinar la resistencia media a compresión de los BTC deben ensayarse tres probetas secas confeccionadas con un BTC partido en dos, asentando ambas mitades con mortero, al igual que la normativa francesa, brasilera y colombiana. Esta publicación es la única que propone encabezar las probetas con placas de neopreno.

En la tabla 1 se resumen los métodos de preparación de las probetas estipulados por cada norma mencionada, junto con la resistencia solicitada y las recomendaciones sobre el encabezado realizadas por cada una de ellas.

Tabla 1: Métodos de ensayo y requisitos estipulados por las normas internacionales

Norma	País	Año	Probeta de ensayo	Resistencia solicitada (MPa)	Encabezado
AFNOR XP P 13-901	Francia	2017	BTC partido en dos, asentado con junta de mortero de cemento de 1 cm de espesor, o el que se empleará en obra (composición y material).	2.0 4.0 6.0	Con pasta de cemento de 3 mm de espesor; o empleando hojas de cartón o madera contrachapada tricapa de 3 mm. Se recomienda no emplear neopreno.
NMX C 508	México	2015	BTC entero, en posición horizontal.	3.0 6.0 9.0	Sólo si es necesario; empleando un mortero de azufre de 35 Mpa de resistencia.
ABNT NBR 8492	Brasil	2012	BTC partido en dos, asentado con junta de pasta de cemento de 3 mm de espesor.	2.0(*)	Remover imperfecciones "raspando" las superficies. Opcionalmente, se puede encabezar con pasta de cemento de 3 mm de espesor.
ABNT NBR 10836	Brasil	2013	BTC entero, asentado con junta de pasta de cemento de 3 mm de espesor.	2.0(*)	Remover imperfecciones "raspando" las superficies. Opcionalmente, se puede encabezar con pasta de cemento de 3 mm de espesor.
NMAC 14.7.8	EE UU	2009	BTC entero, en posición horizontal.	2.1	No se especifica.
UNE 41410	España	2008	BTC entero o medio BTC, en posición horizontal.	1.3 3.0 5.0	Remover imperfecciones "raspando" las superficies. Opcionalmente, se puede encabezar con pasta de cemento de 3 mm de espesor.
NTC 5324	Colombia	2004	BTC partido en dos, asentado con junta de mortero de cemento de 1 cm de espesor, o el que se empleará en obra (composición y material).	2.0 4.0 6.0	Con pasta de cemento de 3 mm de espesor; o empleando hojas de cartón o madera contrachapada tricapa de 3mm. Se recomienda no emplear Neopreno.
IS 1795	India	2002	BTC entero, en posición horizontal.	2.0(*) 3.5(*)	Placas de madera contrachapado tricapa de 3 mm; o placas de yeso.
NZS 4298	Nueva Zelanda	1998	BTC entero, en posición horizontal y vertical	2.0	No se especifica.
RILEM TC164-EBM	Francia	1997	BTC partido en dos, asentado con junta de mortero cementíceo de 1 cm de espesor.	-	Placas de neopreno.

1.2 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es el de unificar protocolos de ensayos para determinar la resistencia a compresión de BTC. Para ello, se propone evaluar la resistencia a compresión simple de diferentes series de probetas, cada una de ellas confeccionadas según las recomendaciones de cada norma analizada y, en base a los resultados obtenidos recomendar el método de preparación de probetas más adecuado.

2 METODOLOGÍA

2.1 – Probetas

Las series de probetas que se propone ensayar son las siguientes:

- Serie A: Bloque entero en posición horizontal
- Serie B: Medio bloque en posición horizontal
- Serie C: Medio bloque apoyado sobre medio bloque.
- Serie D: Medio bloque asentado con mortero sobre medio bloque

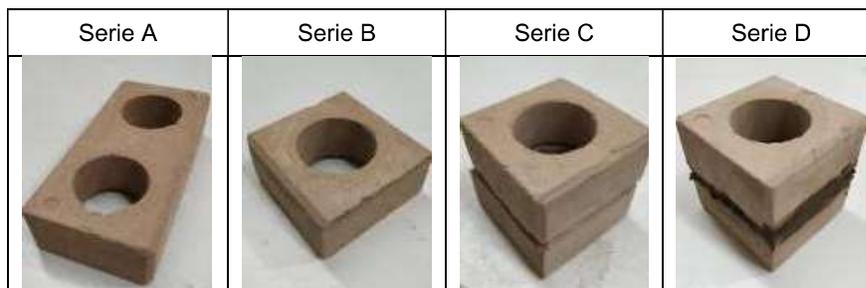


Figura 1: Geometría de las series de probetas sobre las cuales se propone determinar su resistencia a compresión

2.2 – Instituciones participantes

Participaron de esta actividad seis instituciones de México (2), Argentina (2) y Brasil (2), las cuales se indican a continuación junto al nombre abreviado con el que se las identificará durante el resto del trabajo (codificado en función de la ciudad en la cual se radican):

- Universidad Autónoma de Chiapas, México (Chiapas)
- Universidad Autónoma de Tamaulipas, México (Tampico)
- Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe, Argentina (Santa Fe)
- Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Venado Tuerto, Argentina (Venado Tuerto)
- Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Brasil (Campo Grande)
- Laboratório Carmo, Brasil (Rio de Janeiro)

Es importante indicar que, a pesar de haber participado seis instituciones, en este trabajo se estudian ocho series de datos. Esto ocurre porque la Universidad Autónoma de Chiapas participó confeccionando BTC con dos tipos diferentes de suelo, y la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Santa Fe fabricó los BTC con dos tipos de prensas diferentes - una de accionamiento manual y otra de accionamiento hidráulico.

2.3 – Selección del tipo de suelo

Para la selección del suelo adecuado se indicó a cada institución participante que determinen la composición granulométrica, límite líquido y límite plástico de las diferentes alternativas de suelos, seleccionando aquellos que se encuentren dentro del entorno granulométrico definido en la tabla 2 y dentro de la región sombreada de la figura 2.

Los ensayos de determinación de la composición granulométrica y de los límites de Atterberg fueron realizados según las normas vigentes, utilizadas en los laboratorios de geotecnia y mecánica de suelos de cada institución participante.

Finalmente, es importante indicar que, si los suelos disponibles no cumplieren con los requisitos establecidos, éstos pueden combinarse con otros de manera tal de obtener un suelo apto para la fabricación de los BTC.

Tabla 2: Entornos granulométricos recomendados la norma española UNE 41410 para el suelo empleado en la fabricación de BTC

Tamiz		Entornos	
(#)	(mm)	Inferior	Superior
4	4.75	65	100
10	2.00	50	100
20	0.85	40	100
40	0.43	35	95
60	0.25	30	85
100	0.15	25	75
200	0.08	20	65

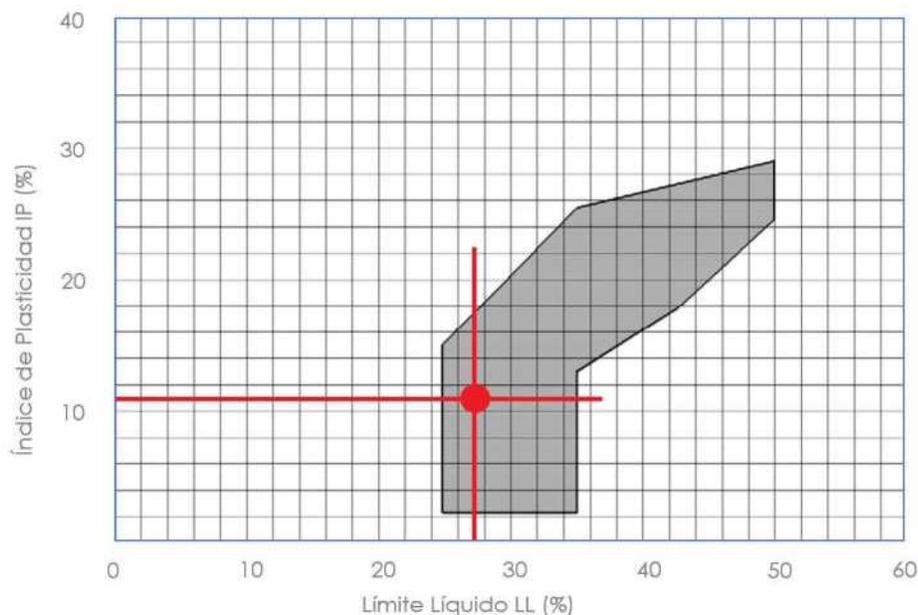


Figura 2: Plasticidad recomendada por la norma española UNE 41410 para el suelo empleado en la fabricación de BTC

2.4 – Fabricación de los BTC

Para conocer el contenido de humedad adecuado para la fabricación de los BTC se recomendó realizar, de manera previa a la confección de los BTC, una prueba de compactación Proctor, la cual permitiría a cada participante establecer la humedad óptima con la que se obtiene la densidad seca máxima para la tierra seleccionada. Para quienes no resultó posible realizar este ensayo, el contenido de humedad óptimo pudo determinarse con la prueba de caída la bola (Neves; Faria, 2011).

Para preparar el mortero constitutivo de los BTC se mezclaron 9 partes (en masa) de tierra seca con 1 parte de cemento Portland hasta obtener un color uniforme. Una vez logrado esto, se adicionó lentamente y por pulverizado, el agua requerida mientras se continuaba mezclando, evitando así la formación de grumos.

Con la tierra estabilizada y el contenido de humedad óptimo, cada institución produjo al menos 30 BTC. Para ser aptos, estos bloques no debían presentar fisuras, y sus vértices y aristas debía estar perfectamente sanos.

Finalmente, inmediatamente luego de ser producidos, los BTC fueron regados con agua y cubiertos con un film de polietileno o nylon para protegerlos del sol y el viento, favoreciendo así la hidratación del cemento. Luego de siete días, pudo removerse la cubierta plástica y se dejaron seco por otros 21 días, preferentemente a la sombra.

2.5 – Dimensiones y densidad de los BTC

Dada la gran variabilidad de formas posibles de bloques, y que en la mayoría de los casos cada institución contaba únicamente con una única prensa para la fabricación de BTC, no hubo restricciones sobre la forma y dimensiones de los bloques producidos. Por este motivo, en esta experiencia se produjeron bloques macizos, huecos y encastrables.

Luego de 28 días de producidos, se determinaron las dimensiones efectivas (en mm) de cada BTC (largo, ancho, alto y diámetro de agujeros) y su peso, de manera tal de poder conocer su geometría y densidad aparente.

2.6– Preparación de las probetas

Como fue indicado en el apartado 1.2, el objetivo principal de este trabajo es evaluar el efecto que posee la geometría en la resistencia a compresión de los BTC, para lo cual, cada institución confeccionó siete probetas de cada serie (ver Figura 1). Si los BTC presentan encastramientos machihembrados, los mismos fueron removidos empleando una espátula, de manera tal que las caras superior e inferior quedaran perfectamente lisas.

Las probetas de las series A no requieren de preparación alguna, mientras que para la preparación de las probetas de las series B, C y D los BTC correspondientes debieron cortarse de manera transversal en dos partes iguales. Finalmente, para confeccionar las probetas de la serie D las dos mitades de cada BTC (previamente humedecidas) se asentaron con 5 mm de mortero de tierra-cemento en proporción 3:1 (en volumen) de manera tal que la cara vertical de una quede en el mismo plano de la sección de corte de la otra (seguir las recomendaciones de la norma brasilera NBR 8492. Esta serie de probetas debió dejarse reposar por siete días antes de ensayarse, logrando así el correcto endurecimiento del mortero de unión.

2.7 – Determinación de la resistencia a compresión

Se colocaron las probetas entre los suplementos metálicos y se verificó que la misma se encuentre perfectamente centrada. Se aplicó la carga de manera continua y sin movimientos bruscos a una velocidad constante comprendida entre 50 y 100 kgf/s, registrándose la máxima carga soportada durante el ensayo. Luego, dividiendo el valor de la carga máxima soportada por cada probeta por su área neta se obtuvo la tensión de rotura de cada una, en kgf/cm².

Las probetas se ensayaron secas, permaneciendo al menos siete días en ambiente de laboratorio (protegidas de la intemperie) a una humedad relativa inferior a 60% y una temperatura de aproximadamente 25 °C. Todas las probetas fueron ensayadas 28 días luego de haber sido producidos.

2.8 - Procesamiento de resultados

Una vez concluida la etapa experimental, cada laboratorio envió al responsable del Programa Interlaboratorial la siguiente información:

- Resultados de los ensayos de caracterización del suelo empleado para la fabricación de los BTC (límites de Atterberg y granulometría);
- Características del cemento Portland empleado en la estabilización;
- Dosificación en peso de los materiales empleados;
- Características e imágenes de la prensa utilizada para la fabricación de los BTC;
- Imágenes de los BTC producidos;
- Dimensiones efectivas y peso de cada BTC;
- Imágenes de cada una de las series de probetas confeccionadas;
- Resistencia a compresión individual de cada probeta ensayada (7 por cada serie).
- Observaciones que consideraron pertinentes.

Finalmente, para evaluar los resultados obtenidos por cada participante y determinar si las resistencias medias a compresión de cada serie son estadísticamente diferentes entre sí, se

realizó un análisis de varianzas ANOVA empleando el software Minitab Statical Software (LLC, 2017). Este análisis permite refutar, con un 95 % de significancia la siguiente hipótesis: “Las resistencias medias a compresión de cada serie son estadísticamente iguales”. Si el valor del estadístico P arrojado por el software es inferiores a 0.05, puede refutarse con un 95% de confianza la hipótesis propuesta, con lo cual, puede asegurarse que al menos una serie de probetas posee una resistencia media a compresión diferente que las demás (Walpole et al. 2012).

Como el ANOVA únicamente posibilita determinar si las resistencias medias de cada serie son estadísticamente diferentes entre sí, pero nada dice sobre cuáles son las series con resistencia similar, o cuales son las series de mayor y menor resistencia; se efectuó además un análisis de parejas de Tukey -empleando también el software MiniTab-, el cual posibilita identificar las series de probetas que presentan resistencias medias estadísticamente similares entre sí, y cuáles son las series con mayor y menor resistencia media a compresión asignándoles un factor de grupo; las series que no compartan el factor de grupo, son significativamente diferentes.

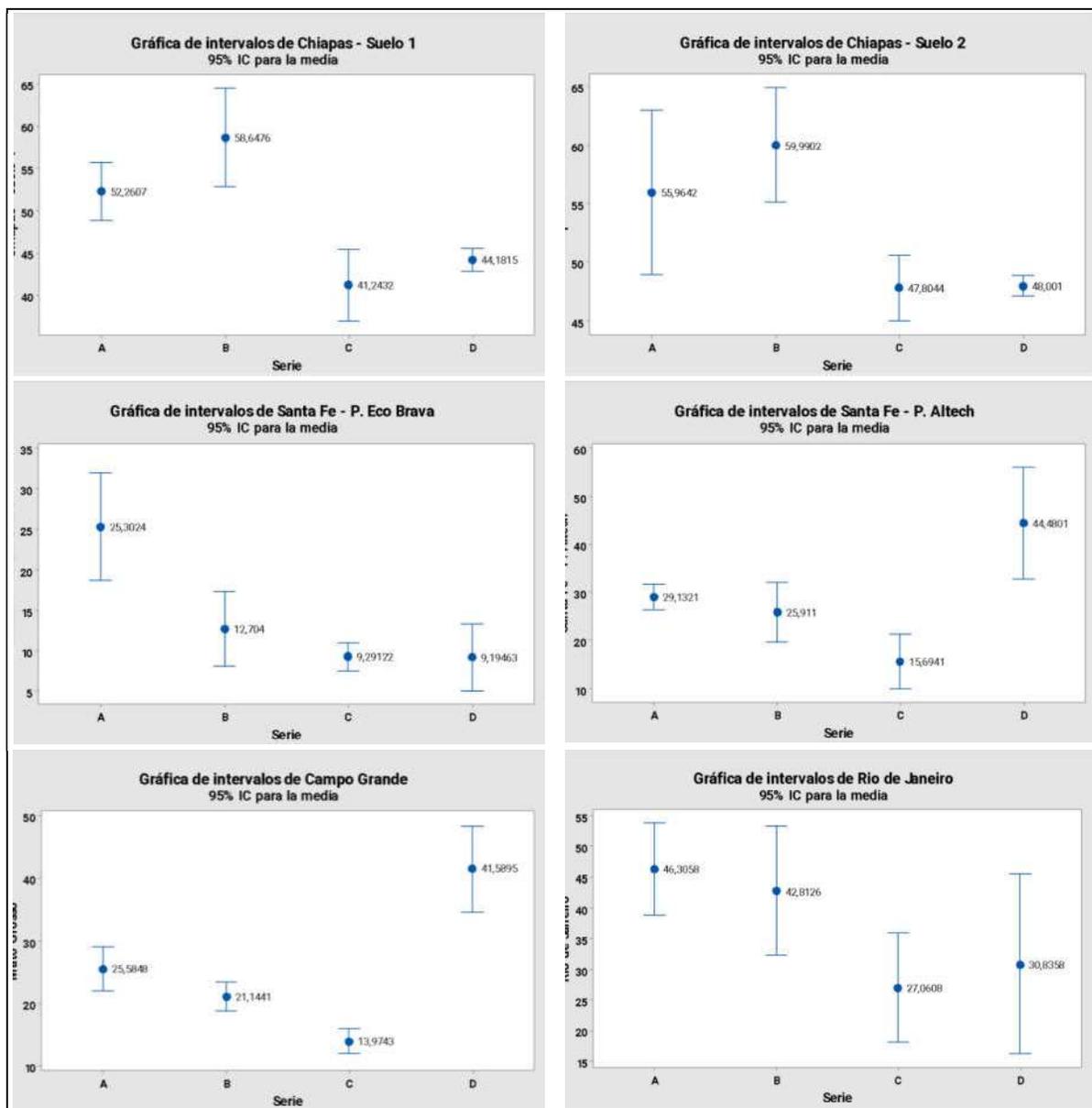
3 RESULTADOS

Tabla 3: Resultados del procesamiento estadístico de los datos aportados por cada participante

ID	Características del bloque					Estadísticos descriptivos básicos				
	Prensa utilizada	Peso (kg)	Tamaño (cm)	Agujeros (cm)	$\frac{\sigma}{\bar{\sigma}}$	N (u)	σ (kgf/cm ²)	Sd (kgf/cm ²)	Cv (%)	FC
Chiapas - Suelo 1	manual (Ceta Ram)	3,13	25x12,5x6,8	2 x 5 cm	A	5	52,26	2,76	5,28	B
					B	5	58,65	4,63	7,89	A
					C	5	41,24	3,38	8,2	D
					D	5	44,18	1,07	2,42	D
Chiapas - Suelo 2	manual (Ceta Ram)	3,08	25x12,5x6,8	2 x 5 cm	A	5	55,96	5,65	10,09	A
					B	5	59,99	3,93	6,56	A
					C	5	47,80	2,23	4,66	B
					D	5	48,00	0,69	1,43	B
Santa Fe prensa hidráulica	hidráulica (Eco brava)	3,55	25x12,6 x7,4	Oquedad longitudinal en la cara inferior	A	5	25,30	5,32	21,02	A
					B	6	12,70	4,37	34,42	B
					C	5	9,29	1,4	15,05	B
					D	5	9,19	3,35	36,49	B
Santa Fe prensa manual	manual (Altech)	5,69	29 x14x8,9	macizo	A	5	29,13	2,19	7,51	B
					B	5	25,91	4,98	19,21	B C
					C	5	15,69	4,59	29,24	C
					D	5	44,48	9,34	20,99	A
Campo Grande	manual (Sahara)	1,49	20x10x5,1	2 x 5	A	7	25,58	3,86	15,1	B
					B	7	21,14	2,52	11,9	B
					C	7	13,97	2,2	15,74	C
					D	7	41,60	7,41	17,81	A
Rio de Janeiro	hidráulica (Verde Equip.)	3,36	25,1x12,5x7	2 x 5,8	A	5	46,31	5,99	12,94	A
					B	5	42,81	8,39	19,6	A
					C	5	27,06	7,14	26,39	B
					D	5	30,84	11,74	38,07	A B
Tampico	manual (Cinva Ram)	7,26	29x14x9	macizo	A	7	48,50	3,81	7,86	A
					B	7	37,98	8,03	21,15	B
					C	7	18,82	1,43	7,61	C
					D	7	25,51	2,46	9,65	C
Venado Tuerto	manual (J Zonni)	2,99	25x12,5x6,1	macizo	A	7	77,13	10,28	13,33	A
					B	4	60,60	24,9	41,14	A
					C	6	27,20	8,84	32,5	B
					D	9	28,94	6,06	20,95	B

En la tabla 3 puede se presentan de manera resumida las características de los BTC producidos por cada participante y los resultados del procesamiento estadístico realizado: número de muestras ensayadas por serie (N), resistencia media a compresión (σ), desviación estándar (Sd), coeficiente de variación (Cv) y factor de grupo (FC) asignado por el análisis de pareja de Tukey.

Asimismo, en la figura 3 pueden apreciarse los gráficos de intervalo de las resistencias medias a compresión de cada serie de datos aportados por los participantes del Programa Interlaboratorial, construidos con un 95% de confianza. En ellos se representa una medida de la tendencia central (en este caso, la resistencia media a compresión de cada serie) y la variabilidad de los datos con los cuales se calculó el valor medio (amplitud de la barra de cada serie).



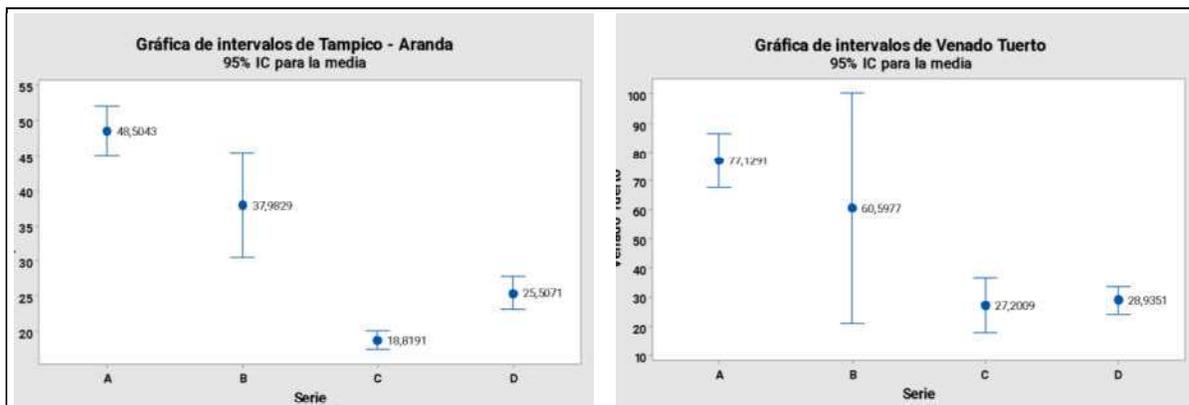


Figura 3: Gráfico de intervalos de la resistencia media a compresión de cada serie de BTC ensayado por los diferentes participantes del Programa

4 DISCUSIÓN

Con base en la tabla 4, se observa que los bloques se agrupan según se ensayen individualmente o superpuestos, es decir, en general, las series A y B en un grupo y las series C y D en otro grupo. Esto demuestra que el modo de ensayo influye en el resultado final de la resistencia a la compresión.

Tabla 4: Resumen del factor de grupo de cada serie, ordenados por color

	A	B	C	D
Chiapas - Suelo 1	B	A	D	D
Chiapas - Suelo 2	A	A	B	B
Santa Fe - Prensa hidráulica	A	B	B	B
Santa Fe - Prensa manual	B	B, C	C	A
Campo Grande	B	B	C	A
Rio de Janeiro	A	A	B	B
Tampico	A	B	C	C
Venado Tuerto	A	A	B	A, B

Tabla 5: Resumen de la resistencia a la compresión (kgf/cm²), con clasificación de color creciente

	A	B	C	D
Chiapas - Suelo 1	52.26	58.65	41.24	44.18
Chiapas - Suelo 2	55.96	59.99	47.80	48.00
Santa Fe - Prensa hidráulica	25.30	12.70	9.29	9.19
Santa Fe - Prensa manual	29.13	25.91	15.69	44.48
Campo Grande	25.58	21.14	13.97	41.60
Rio de Janeiro	46.31	42.81	27.06	30.84
Tampico	77.13	60.60	27.20	28.94
Venado Tuerto	48.50	37.98	18.82	25.51

A través de los resultados de la tabla 5, se observa que, en los ensayos realizados por los diferentes laboratorios, la geometría de las probetas ensayadas afecta su resistencia media a compresión. En general, los valores más altos de resistencia a la compresión se dan en las series A y B, donde no existe superposición de los bloques durante el ensayo. Cabe destacar que, al ensayar un bloque aislado, es posible evaluar la resistencia específica de esa unidad individual y obtener resultados más confiables para el análisis.

Esto ocurre porque ensayar dos bloques superpuestos puede introducir variables adicionales, como la interacción entre los bloques y la distribución desigual de la carga, lo que afecta la precisión de los resultados. El estudio de Morel, PkIa y Walker (2007) complementa que el ensayo de bloques superpuestos puede conducir a la evaluación de la resistencia de la albañilería no confinada, en lugar de la resistencia específica del bloque individual. Cabe

destacar que el 60% de las normas específicas para bloques (ver tabla 1) prevén el uso de bloques completos al momento de la prueba, son: NMX C 508 (2015), ABNT NBR 10836 (2013), NMAC 14.7 .8 (2009), UNE 41410 (2008), IS 1795 (2002), NZS 4298 (1998).

Otro punto interesante es la diferencia en los resultados obtenidos en la ciudad de Santa Fe, considerando el uso de prensas manuales e hidráulicas para la fabricación de BTC. Cuanto mayor sea la fuerza de compresión para la fabricación de los bloques, menor será el número de vacíos, por lo tanto, mayor será la masa específica. Así, es evidente que la forma de compresión en la fabricación del bloque también influirá en el resultado final de la resistencia a compresión, siendo un factor a tener en cuenta en la normativa.

En general, la prueba de Tukey mostró que en la mayoría de las muestras analizadas no hubo diferencia significativa en la resistencia mecánica al comparar los bloques ensayados en posición horizontal de las series A y B; y entre las series C y D formadas por bloques superpuestos, indicando que la esbeltez de la sonda fue la variable de mayor influencia en los valores medios de resistencia a la compresión de los bloques de suelo-cemento. Este comportamiento durante el experimento refleja el efecto de confinamiento de la carga, que según Silva et al. (2010) y Gumaste et al. (2007) se puede hacer compatible utilizando un factor de corrección que se encuentra en las correlaciones existentes entre la resistencia confinada y la relación altura/ancho de la sonda.

5 CONCLUSIONES

Los resultados indican que el modo de ensayo de los bloques de tierra comprimida (BTC) impacta en la resistencia a la compresión obtenida. Los bloques individuales y los bloques superpuestos se agrupan en diferentes categorías, lo que demuestra que el modo de ensayo influye en el resultado final. Se ha observado que las series A y B, donde no hay superposición de bloques, exhiben los valores más altos de resistencia a la compresión. En contraste, ensayar bloques superpuestos introduce variables adicionales que pueden afectar la precisión de los resultados, como la interacción entre bloques y la distribución desigual de carga.

Además, se destaca la importancia del método de compactación utilizado en la fabricación de los bloques. Los resultados obtenidos en la ciudad de Santa Fe revelan diferencias significativas entre el uso de prensas manuales y prensas hidráulicas. La fuerza de compresión aplicada durante la fabricación de los bloques influye en el número de vacíos y en la masa específica de los mismos. Cuanto mayor sea la fuerza de compresión, menor será el número de vacíos y mayor será la masa específica. Por lo tanto, la forma de compactación en la fabricación del bloque también debe ser considerada en las normativas relacionadas con la resistencia a la compresión de los BTC.

El objetivo principal de este trabajo es intentar unificar los protocolos de ensayo para determinar la resistencia a compresión de los bloques de tierra comprimida (BTC). Aunque no se puede afirmar que una técnica sea superior a otra, existen enfoques diferentes. Ensayar los bloques individualmente es más adecuado para comprender sus características generales, mientras que probarlos en forma de bloques superpuestos proporciona información específica sobre su comportamiento en una estructura de mampostería. La unificación de los protocolos permitirá establecer un estándar consistente y facilitar el análisis y comparación en futuras investigaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (2012). NBR 8492: Tijolo de solo-cimento. Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABNT (2013). ABNT NBR 10836. Bloco de solo-cimento sem função estrutural — Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas

AENOR (2008). UNE 41410. Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones,

especificaciones y métodos de ensayo.

AFNOR (2017). XP P13-901: Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception.

ICONTEC (2005). NTC 5324. Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega.

IS (2013). Standard IS 1725. Specification for soil based blocks used in general building construction.

Gumaste, K. S.; Nanjunda Rao, K. S.; Venkatarama Reddy, B. V.; Jagadish, K. S. (2007). Strength and elasticity of brick masonry prisms and wallettes under compression. *Materials and structures*, 40, 241-253. <https://doi.org/10.1617/s11527-006-9141-9>.

LLC, M. (2017). Minitab Statical Software.

Morel, J. C.; Pkla, A.; Walker, P. (2007). Compressive strength testing of compressed earth blocks. *Construction and Building materials*, 21(2), 303-309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.08.021>

Neves, Celia; Faria, Obede B. (Org.) (2011). Técnicas de construcción con tierra. Bauru: FEB-UNESP/ PROTERRA. https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/05/4a_PP-Tecnicas-de-construccion-con-tierra_2011.pdf

Neves, Célia; Faria, Obede B. (2008). Programa Interlaboratorial PROTERRA. Ensaio de adobe. Seminário Ibero-americano de Arquitetura e Construção com Terra (7), Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil (2). Memórias TerraBrasil 2008... São Luís, Brasil: UEMA / PROTERRA/ TerraBrasil. p. 29-38. https://redproterra.org/wp-content/uploads/2020/06/7-SIACOT-Brasil-2008_.pdf

NMAC. (2009). NMAC 14.7.4: New Mexico earthen building materials code.

Olivier, M.; Mesbah, A.; El Gharbi, Z.; Morel, J. C. (1997). Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée. *Materials and Structures*, 30(9), 515–517. <https://doi.org/10.1007/bf02486394>

ONNCCE (2015). NMX-C-508 Industria de la Construcción. Bloques de tierra comprimida estabilizados con cal. Especificaciones y métodos de ensayo.

Silva, A. S.; da Silva Milani, A. P.; Bertocini, S. R. (2010). Avaliação preliminar de métodos de ensaio para caracterização mecânica de blocos de terra comprimida. Congresso de Arquitetura e Construção com Terra no Brasil (3), Anais... Campo Grande, Brasil: TerraBrasil/UFMS. p. 34-43. <https://redeterrabrasil.net.br/publicacoes/>

SNZ. (1998). NZS 4298: Materials and workmanship for earth buildings.

Walpole, R.; Myers, R.; Myers, S.; Ye, K. (2012). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. México: Pearson Education.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo pudo realizarse gracias al trabajo y la colaboración de las siguientes personas: Ana Milani (Brasil), Arturo López (México), Benjamín Hernández (México), Celia Neves (Brasil), Fernando Minto (Brasil), Lucas Félix da Costa Gonçalves (Brasil), Obede Borges Farias (Brasil), Pablo Costamagna (Argentina), Rubén Salvador Roux (México) y Yolanda Aranda (México).

AUTORES

Santiago Cabrera, ingeniero civil y doctor en Ingeniería por la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe (UTN FRSF) (Argentina). Actualmente es codirector del Grupo de Investigación y Desarrollo en Técnicas de Construcción con Tierra de la UTN FRSF; codirige la Red Argentina de Construcción con Tierra PROTIERRA e integra la Red Iberoamericana PROTERRA.

Mayara Tartarotti Cardozo da Silva, engenheira civil e mestrande em Eficiência Energética e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (Brasil). Pesquisadora sobre o desempenho higrotérmico e mecânico de construções de terra, com foco na taipa.