

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE
UNIDADES Y PRISMAS DE BLOQUES DE TIERRA
COMPRIMIDA ESTABILIZADA CON CEMENTO Y
GEOPOLÍMERO DE PUZOLANA**

Tesis para optar el grado de Magíster en Ingeniería Civil que presenta

SYNDY YESENIA ALVAREZ ORDOÑEZ

Dirigido por

DR. RAFAEL AGUILAR VÉLEZ

San Miguel, 2018

Contenido

Agradecimientos i

Resumen ii

CAPITULO 1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Importancia	2
1.2.	Objetivos	5
1.3.	Organización	6
CAPITULO 2.	ESTADO DEL ARTE	8
2.1.	La construcción con tierra y su desarrollo en el tiempo	9
2.1.1.	Evolución de la construcción con tierra	9
2.1.2.	Las construcciones de tierra más emblemáticas en el mundo	11
2.1.3.	Las construcciones de tierra más emblemáticas en el Perú	14
2.1.4.	Desarrollo de la investigación sobre la construcción con tierra en el Perú	15
2.1.5.	Normativa existente sobre la construcción con tierra.....	17
2.2.	Bloque de tierra comprimida (BTC)	18
2.2.1.	Reseña histórica de los bloques de tierra comprimida.....	18
2.2.2.	Evolución del proceso de fabricación de los bloques de tierra comprimida.....	18
2.2.3.	Máquinas utilizadas para la fabricación de BTC.....	19
2.2.4.	Normativa existente sobre la fabricación y construcción con BTC	21
2.2.5.	Ensayos experimentales realizados para el estudio del BTC.....	22
2.2.6.	Procedimiento constructivo de viviendas de BTC	25
2.3.	Estabilización química del suelo como material de construcción	28
2.3.1.	Estabilización de suelo con cemento	29
2.3.2.	Estabilización de suelo con geopolímeros.....	30
2.3.3.	Estabilización de suelo con otros agentes estabilizantes	30
CAPITULO 3.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	32
3.1.	Ensayos para la caracterización física del suelo.....	33
3.1.1.	Contenido de humedad.....	33
3.1.2.	Análisis granulométrico	33
3.1.3.	Límites de consistencia	34
3.1.4.	Gravedad específica del suelo por el picnómetro de agua (Gs).....	34
3.1.5.	Ensayo de compactación Proctor Estándar.....	34
3.2.	Ensayos para la caracterización mecánica de BTC y del sistema de mampostería.....	35
3.2.1.	Ensayo de compresión de unidades de BTC	35
3.2.2.	Ensayo de flexión en tres puntos de unidades de BTC.....	36
3.2.3.	Ensayo de compresión de prismas de BTC con junta seca.....	37

3.2.4.	Parámetros obtenidos a partir de los ensayos mecánicos	38
CAPITULO 4.	PROCESO DE PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE BTC	40
4.1.	Análisis del suelo base	41
4.1.1.	Caracterización física del suelo base	41
4.1.2.	Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo base	42
4.2.	Producción de BTC	44
4.2.1.	Geometría del BTC	44
4.2.2.	Proceso de producción de BTC	45
4.3.	Caracterización mecánica de BTC	47
4.3.1.	Ensayo de compresión de BTC	47
4.3.2.	Ensayo de flexión en tres puntos de BTC.....	48
CAPITULO 5.	PROCESO DE PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE BTCs ESTABILIZADA	50
5.1.	Producción y caracterización mecánica de BTCs estabilizada con cemento.....	51
5.1.1.	Descripción de los materiales	51
5.1.2.	Proceso de estabilización química y producción	51
5.1.3.	Caracterización mecánica a compresión y flexión	53
5.2.	Producción y caracterización mecánica de BTCs estabilizada con puzolana activada alcalinamente.....	57
5.2.1.	Descripción de los materiales	57
5.2.2.	Proceso de estabilización química y producción	59
5.2.3.	Caracterización mecánica a compresión y flexión	61
5.3.	Discusión de resultados	65
CAPITULO 6.	CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MAMPOSTERÍA DE BTC DE JUNTA SECA	70
6.1.	Descripción del sistema de mampostería de junta seca de BTC interconectado	71
6.2.	Descripción de especímenes de ensayo	71
6.3.	Caracterización mecánica con ensayos de compresión uniaxial en prismas	73
6.4.	Discusión de resultados	76
CAPITULO 7.	CONCLUSIONES.....	78
7.1.	Conclusiones	79
7.2.	Futuro de la investigación	83
ANEXOS		84
Referencias		91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Fallas convencionales debido a terremotos en estructuras de tierra (Adaptado, CENAPRED, México, 2000)	3
Figura 2.1: Distribución mundial de construcciones con tierra (De Sensi, 2003)	9
Figura 2.2: Construcción de techo de Domocaña en Moquegua (R. Barrionuevo, 2011)	11
Figura 2.3: Construcciones emblemáticas de tierra (a) Gran Mezquita de Djenné (b) Recreación de Çatal Hüyük	12
Figura 2.4: Ciudadela de Bam	13
Figura 2.5: Zigurat Choga Zanbil	13
Figura 2.6: Sección de la Gran Muralla China en el desierto construida con tierra apisonada	14
Figura 2.7: Panorámica del Templo de la Luna o Acllahuasi en Pachacamac	15
Figura 2.8: Parte de la ciudadela de Chan Chan	15
Figura 2.9: Albañilería tradicional de las Huacas del sol y de la luna	15
Figura 2.10: Vista general de la huaca del sol y de la luna	15
Figura 2.11: Primer modelo de prensa CINVA Ram	18
Figura 2.12: Tipos de bloques fabricado por la máquina Aurum 3000	19
Figura 2.13: Presas para fabricar BTC (a) Aurum 300 (b) Hydraform 7	20
Figura 2.14: Distintos tipos de formas de BTC con sistema de interconexión producidos con la prensa Soeng Thai modelo BP6 (a) (Qu, et al., 2015) (b) (Wheeler 2005)	20
Figura 2.15: Máquina EcoBrava (a) modelo patentado (b) tipos de bloque fabricados	21
Figura 2.16: Proceso de fabricación de los BTC a pie de obra (T. Sturm, 2014)	25
Figura 2.17: Detalles de la construcción de la cimentación (T. Sturm, 2014)	26
Figura 2.18: Apilado correcto de muros (T. Sturm, 2014)	27
Figura 2.19: Colocación del techo de la vivienda (T. Sturm, 2014)	28
Figura 2.20: Red sialato (silico-oxo-aluminato) que consiste en tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos compartidos de oxígeno	30
Figura 3.1: Ensayo de granulometría (a) Tamices para el análisis granulométrico de las muestras retenidas en la malla N°200 (b) Dispersión de la muestra que pasa la malla N°200 con hexametáfosfato de sodio (c) Probeta contenida con la muestra que pasa la malla N°200 dispersada para realizar las lecturas con el hidrómetro	33
Figura 3.2: Ensayos para la caracterización física del suelo (a) Proceso para determinar el contenido de humedad (b) Eliminación del aire atrapado en la bomba de vacío para determinar el peso específico de suelos (c) Ensayo de proctor estándar	35
Figura 3.3: Configuración del ensayo de compresión de BTC (280x140x75 mm)	36
Figura 3.4: Configuración del ensayo de flexión en tres puntos	37
Figura 3.5: Configuración del ensayo de compresión de prismas (a) Vista frontal (b) Vista lateral izquierda	38
Figura 3.6: Módulo de elasticidad que se calcula entre el esfuerzo ubicado debajo del límite proporcional y R (precarga)	39
Figura 4.1: Suelo base (S-1) proveniente del distrito de Ventanilla	41
Figura 4.2: Muestreo del suelo base S-1	41
Figura 4.3: Curva granulométrica del suelo base S-1	42
Figura 4.4: Curva granulométrica del suelo Ag-1, S-2, S-3	43
Figura 4.5: Curva de compactación del suelo S-2	44

Figura 4.6: Geometría del BTC (unidades en mm) (a) vista isométrica (b) vista en planta (c) corte transversal (d) corte longitudinal.....	44
Figura 4.7: Equipos utilizados para la producción de BTC (a) mezcladora de eje vertical (b) máquina Eco Brava	45
Figura 4.8: Proceso de producción de BTC (a) Tamizado del suelo con malla de 5mm de abertura (b) mezclado del suelo, la arena y agua (c) colocación del material dentro de la caja de la máquina (d) compresión del suelo con el sistema hidráulico de la máquina Eco Brava (e) producto final	46
Figura 4.9: BTC fabricados con la máquina Eco Brava (a) BTC recién fabricados (b) BTC secos a los 28 días.....	46
Figura 4.10: Evolución de la resistencia a la compresión de BTC a los 7, 14 y 28 días	47
Figura 4.11: Curva de esfuerzo-deformación de BTC a los 28 días de edad	48
Figura 4.12: Ensayo de flexo-tracción sobre BTC de edad de 56 días (a) Montaje del ensayo en el LEDI (b) Falla de la muestra.....	48
Figura 4.13: Curva de fuerza-deflexión de BTC a los 56 días de edad.....	49
Figura 5.1: Producción de BTC (a) tamiz con abertura de 5 mm (b) mezclado de los materiales secos en la mezcladora de eje vertical (c) producción de BTC en la máquina Eco Brava (d) BTCE con 5% de cemento (e) BTCE con 8% de cemento (f) BTCE con 10% de cemento	52
Figura 5.2: Producción de BTCE con 8% de cemento (a) Total de muestras fabricadas (b) muestra para ensayo de compresión	54
Figura 5.3: Ensayo de compresión de BTC (a) montaje del ensayo en el LEDI (b) falla de la muestra	54
Figura 5.4: Evolución de la resistencia a la compresión de BTCE con 8% de cemento a los 7, 14 y 28 días	55
Figura 5.5: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 8% de cemento a los 28 días de edad... ..	55
Figura 5.6: Estado saturado de BTC estabilizada con 8% de cemento a los 56 días de edad (a) Muestra saturada (b) Variación de la resistencia a la compresión.....	56
Figura 5.7: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 8% de cemento a los 56 días de edad en estado saturado	56
Figura 5.8: Ensayo de flexión en tres puntos sobre BTCE con 8% de cemento a los 56 días (a) Montaje del ensayo en el LEDI (b) Falla de la muestra	57
Figura 5.9: Curva de fuerza-deflexión de BTCE con 8% de cemento a los 56 días de edad	57
Figura 5.10: Forma de la partícula de la puzolana obtenida de la técnica del microscopio electrónico de barrido (MEB).....	58
Figura 5.11: Lote de puzolana en bolsas antihumedad de 15 kg.....	59
Figura 5.12: Componentes del activador alcalino (a) silicato de sodio (b) hidróxido de sodio (c) solución de hidróxido de sodio con agua destilada con concentración 10 molar	60
Figura 5.13: Proceso de producción de BTCE con geopolímero de puzolana (a) mezclado de los insumos secos (b) compresión hidráulica (c) BTCE con puzolana	60
Figura 5.14: Ensayo de compresión de BTCE con geopolímero de puzolana	62
Figura 5.15: Modo de falla a compresión del BTCE con geopolímero de puzolana de espécimen. ..	62
Figura 5.16: Evolución de la resistencia a la compresión de BTCE con 15% geopolímero de puzolana de puzolana a los 7, 14 y 28 días.....	63
Figura 5.17: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 15% geopolímero de puzolana a los 28 días de edad.....	63
Figura 5.18: Estado saturado de BTC estabilizada con 15% de puzolana activada alcalinamente a los 56 días de edad (a) Muestra saturada (b) Variación de la resistencia a la compresión	64

Figura 5.19: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana a los 56 días de edad en estado saturado.....	64
Figura 5.20: Ensayo de flexo-tracción sobre BTCE con geopolímero de puzolana a los 56 días (a) Montaje del ensayo en el LEDI (b) Falla de la muestra	65
Figura 5.21: Curva de fuerza-deflexión de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana de puzolana a los 56 días de edad	65
Figura 5.22: Comparación de resistencia a la compresión de BTC estabilizada con distintos porcentajes de agente estabilizante a los 7 días de edad.....	66
Figura 5.23: Comparación de las curvas de evolución de la resistencia a la compresión de BTC, BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana .	67
Figura 5.24: Resistencia a la compresión de las muestras de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de geopolímero de puzolana a los 7, 14 y 28 días de edad.....	67
Figura 5.25: Resultados de la resistencia a la compresión en estado saturado a los 56 días	68
Figura 5.26: Variación del módulo de rotura de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de puzolana activada alcalinamente a una edad de 56 días	69
Figura 6.1: Mampostería de junta seca (a) Sistema de interconexión endentada hembra – macho de BTC (b) apilamiento de mampostería paño simple (c) apilamiento de mampostería de doble paño	71
Figura 6.2: Prismas de BTC de 140x280x375 mm (a) procedimiento de construcción (b) espécimen de prueba instrumentado	72
Figura 6.3: Ensayo de compresión de prismas de BTCEI a los 56 días a) Montaje del ensayo en el LEDI b) Falla de la muestra	73
Figura 6.4: Ensayo de compresión de prismas de BTCEI con cemento a los 56 días a) Montaje del ensayo en el LEDI b) Falla de la muestra.....	73
Figura 6.5: Ensayo de compresión de prismas de BTCEI con geopolímero de puzolana a los 56 días a) Montaje del ensayo en el LEDI b) Falla de la muestra	74
Figura 6.6: Variación de la resistencia a la compresión de mampostería (f_m) de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de puzolana activada alcalinamente a una edad de 56 días.....	74
Figura 6.7: Curva de esfuerzo-deformación de BTC	75
Figura 6.8: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 8% de cemento.....	75
Figura 6.9: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana.....	76
Figura 6.10: Envolvente de curvas esfuerzo–deformación de prisma de BTC estabilizada con 15% de puzolana activada a los 56 días de edad	77

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Cuadro de normas de construcción con tierra (Cid, et al., 2011)	17
Tabla 2.2. Normas y reglamentos de BTC por su contenido. Adaptado, (Cid, et al., 2011)	22
Tabla 2.3. Resistencia a la compresión mínima requerida según diversas normas	23
Tabla 2.4. Módulo de rotura mínimo según la normativa vigente.....	23
Tabla 3.1. Composición recomendada de suelos aptos para la construcción	34
Tabla 4.1. Resultados de la caracterización física del suelo S-1	41
Tabla 4.2. Composición química del suelo S-1 obtenida del ensayo XRF.....	42
Tabla 4.3. Límites de consistencia de los suelos Ag-1, S-2 y S-3	43
Tabla 4.4. Composición química del suelo S-2 obtenida del ensayo XRF.....	43
Tabla 4.5. Detalle de muestras de BTC ensayados.....	47
Tabla 4.6. Esfuerzo a la flexión de BTC a los 56 días de edad	48
Tabla 5.1. Comparación de la resistencia a la compresión respecto a la cantidad de cemento incorporado a los 7 días de edad en la etapa de estabilización química con cemento	53
Tabla 5.2. Detalle de muestras de BTC estabilizada con 8% de cemento ensayados.....	53
Tabla 5.3. Esfuerzo a la flexión de BTCE con 8% de cemento a los 56 días de edad.....	57
Tabla 5.4. Composición química de la puzolana obtenida del ensayo XRF	58
Tabla 5.5. Composición química del hidróxido de sodio	59
Tabla 5.6. Composición química del silicato de sodio	59
Tabla 5.7. Comparación de la resistencia a la compresión respecto a la cantidad incorporada de puzolana activada alcalinamente a los 7 días de edad en la etapa de estabilización con geopolímero	61
Tabla 5.8. Detalle de muestras de BTC estabilizada con 15% de puzolana activada ensayados.....	61
Tabla 5.9. Esfuerzo a la flexión de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana a los 56 días	65
Tabla 5.10. Módulo de elasticidad obtenido de la curva de esfuerzo – deformación del ensayo de compresión de BTC y BTC estabilizados a los 28 días de edad.....	67
Tabla 5.11. Resistencia a la compresión en estado saturado a los 56 días de BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana.....	68
Tabla 5.12. Módulo de elasticidad obtenido de la curva de esfuerzo – deformación del ensayo de compresión de BTC y BTC estabilizados en estado saturado a los 56 días de edad	68
Tabla 5.13. Módulo de elasticidad obtenido de la curva de esfuerzo – deformación del ensayo de flexión en tres puntos de BTC y BTC estabilizados en estado saturado a los 56 días de edad	69
Tabla 6.1. Detalle de muestras de ensayo a compresión uniaxial de prismas	72
Tabla 6.2. Propiedades de prismas de BTCEI con 8% de cemento y BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana a los 56 días de edad	77
Tabla 7.1. Relación de la resistencia a la compresión de prismas (56 días) y unidades de BTC (28 días).....	82

Agradecimientos

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) y al Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO) por invertir en el proyecto: "Geobloque: Desarrollo de bloques de construcción ultraligeros con geopolímeros" (Convenio N°105-2017), cuya financiación ha permitido el desarrollo de mi tesis.

Estoy sumamente agradecida con el doctor Rafael Aguilar Vélez, quien aceptó asesorar mi tesis de maestría y me guió durante este proceso. Poseo una enorme gratitud hacia él ya que tramitó una beca que la Escuela de Posgrado me concedió para financiar mis estudios de los últimos ciclos de la maestría.

Agradezco a la empresa Cia Minera – Agregados Calcáreos S.A. (COMACSA) que suministró la puzolana que fue usada en el presente estudio. Además, la empresa nos permitió el uso de sus instalaciones para el análisis físico y químico de los materiales utilizados en esta investigación.

De manera especial, agradezco a Dios omnipotente, a mi familia, a mis padres Victoria y Rene, y a mi hermana Jessica por creer en mí y apoyarme incondicionalmente. Ellos han sido imprescindibles para la culminación de este proyecto. Además, le agradezco a mis compañeros del departamento de *Engineering & Heritage* quienes me brindaron sus consejos, su aliento y su amistad.

Resumen

El interés y la necesidad de los países en desarrollo en el uso de la tierra como material de construcción ha fomentado el estudio continuo de sistemas de construcción más resistentes, económicos y sostenibles. Una de las tecnologías más conocidas es la construcción industrial con Bloques de Tierra Comprimida (BTC) que beneficia esencialmente a las regiones con bajo desarrollo económico. Los BTC son unidades de albañilería con geometría y propiedades físicas y mecánicas homogéneas. Los BTC son fabricados en base a tierra con determinadas características granulométricas, la cual es compactada dentro del molde de una máquina con forma definida. La evolución en la fabricación de BTC permite que el proceso sea más rápido, sencillo y automatizado. Uno de los avances más útiles en las máquinas de fabricación de BTC es la incorporación de un sistema hidráulico para compactar el suelo, lo cual evita la compactación manual que solía ser el proceso convencional. En la actualidad, existen máquinas que producen BTC de diversas formas y tamaños para su uso en mampostería. En la presente investigación, la forma del BTC consiste en un prisma rectangular con un sistema de interconexión de 10 mm que se encuentra en las superficies superior e inferior del bloque. El sistema de interconexión permite el enganche de los BTC y provee resistencia al corte a la mampostería. Además, posee dos agujeros de 90 mm cada uno que atraviesan el cuerpo del BTC, los cuales reducen la masa sísmica y permiten la colocación de refuerzo vertical.

La tierra utilizada para la fabricación de BTC es sometida a un proceso de estabilización. La estabilización química de suelos para la fabricación de BTC ha sido foco de atención de diversos investigadores que buscan mejorar sus propiedades mecánicas de forma económica y ecosostenible. Uno de los métodos más conocidos es la estabilización química con cemento. Sin embargo, el cemento produce un impacto ambiental negativo durante su ciclo de vida. La presente investigación incluyó el uso de un geopolímero de puzolana, con lo cual se estudia un material de construcción que no solo genere menos cantidad de CO₂ en su producción, sino que también posea propiedades mecánicas adecuadas para la construcción de viviendas económicas. El objetivo del estudio es comparar las propiedades mecánicas de las unidades y prismas de BTC estabilizados con cemento y geopolímero de puzolana teniendo como línea base de comparación al BTC convencional fabricado sin agente estabilizante.

El estudio comienza con el estado del arte de la construcción con tierra y de BTC. Posteriormente, se presenta el protocolo de los ensayos ejecutados durante de la campaña experimental. A continuación, se desarrolla la campaña experimental dividido en tres partes: i) proceso de producción y caracterización mecánica de BTC, ii) proceso de producción y caracterización mecánica de BTC estabilizada y iii) caracterización mecánica del sistema de mampostería de BTC de junta seca. Finalmente, el análisis comparativo del estudio se lleva a cabo en base a los resultados obtenidos de la caracterización mecánica de las unidades y prismas de BTC, BTC estabilizada con cemento y BTC estabilizada con geopolímero de puzolana.

El suelo base analizado proveniente del distrito de Ventanilla, Callao, fue mejorado con arena gruesa con la finalidad de que la curva granulométrica del suelo mejorado se encuentre dentro del huso granulométrico indicado en la norma UNE 41410 (2008). El proceso de estabilización química del suelo permitió conocer que el contenido óptimo de cemento es de 8% y de geopolímero de puzolana de 15%. El porcentaje óptimo de agente estabilizante óptimo cumple con la resistencia a la compresión mínima requerida por la norma UNE 41410 (2008) que es de 1.3 MPa para ambos casos.

Los resultados de la caracterización mecánica de BTC y BTC estabilizada se realizó en términos de la compresión y flexión. Se obtuvieron resistencias a la compresión a los 28 días de edad de 1.3 MPa (CV 6.2%), 3.6 MPa (CV 17.9%) y 2.4 MPa (CV <1%) para BTC, BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente. La resistencia a la compresión en estado saturado del BTC estabilizada con 8% de cemento bajó en 52% respecto a su resistencia a los 28 días de edad y en un 66% en el caso del BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana. Además, se obtuvo el módulo de elasticidad (E) de cada tipo de BTC: 88.2 MPa (CV 2%), 249.9 MPa (CV 3%) y 208.5 MPa (CV 3%) para el BTC, BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente. Finalmente, se obtuvo la resistencia a la flexión, que resultó 0.1 MPa (CV <1%), 0.7 MPa (CV 24.8%) y 0.2 MPa (CV 23.2%) correspondiente a los BTC, BTC estabilizada con 8% y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente.

La caracterización de la mampostería de BTC de junta seca mediante el ensayo de compresión uniaxial dio como resultado resistencias a la compresión de 0.40 MPa

(CV <1%), 1.44 MPa (CV 4%) y 0.75 MPa (CV 9%) para prismas de BTC, BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente. Se obtuvieron, además, el módulo de elasticidad (E), el módulo de Poisson (ν) y el módulo de corte (G) en cada caso.



CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN



1.1. Importancia

El INEI (2017) estima que la población se incrementará a 40 millones para el año 2050. Esta cifra refleja la creciente demanda de viviendas existente y esto representa un problema cuando hay un desequilibrio entre esta necesidad y la incapacidad económica de la población para cubrirla. En Perú, el 21.7% de la población es declarada monetariamente pobre (INEI, 2017). Este sector poblacional al no tener el dinero suficiente para construir una vivienda de concreto armado y/o albañilería optan por habitar en viviendas precarias. Las viviendas precarias son vulnerables frente a un desastre natural y sus habitantes corren el riesgo de perder sus artículos de primera necesidad incrementado así el nivel de pobreza. Por otro lado, las construcciones de concreto armado y/o albañilería son predominantes en el mundo de la construcción por su estética, durabilidad y resistencia frente a diferentes tipos de solicitaciones. Sin embargo, este tipo de construcciones provocan efectos ambientales dañinos durante su ciclo de vida y además son costosas. Sin contar que, en regiones de moderada a alta sismicidad es necesario emplear un sistema antisísmico, lo que conlleva a un incremento adicional del costo de la construcción. Por este motivo, contribuir con el estudio de técnicas de construcción resistentes a desastres naturales económicas y ecosostenibles sigue siendo un reto para los investigadores de nuestra época.

El uso de la tierra cruda como material de construcción es una alternativa potencial en reemplazo de materiales como el cemento y la albañilería sobre todo en regiones con bajo desarrollo económico. Actualmente, aproximadamente el 34% de la población peruana habita en viviendas de tierra (INEI, 2017). Sin embargo, el sistema estructural de viviendas de tierra tiene muchas limitaciones. Los daños que se han producido en las viviendas de tierra a lo largo de la historia producto del intemperismo y/o desastres naturales son numerosos. Una prueba de esta realidad ocurrió el 15 de agosto del 2007 durante el terremoto de Pisco. El terremoto tuvo una duración de aproximadamente 210 segundos, una magnitud de 7.0 en la escala de Richter y un hipocentro de 40 km. Aproximadamente, 135 mil viviendas, que en su mayoría eran de adobe, quedaron inhabitadas durante el evento sísmico y además murieron alrededor de 600 personas y des aparecieron más de 300 (INDECI, 2008). Las fallas estructurales en estructuras de tierra debido a terremotos han sido estudiadas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) las cuales se pueden observar en la Figura 1.1.

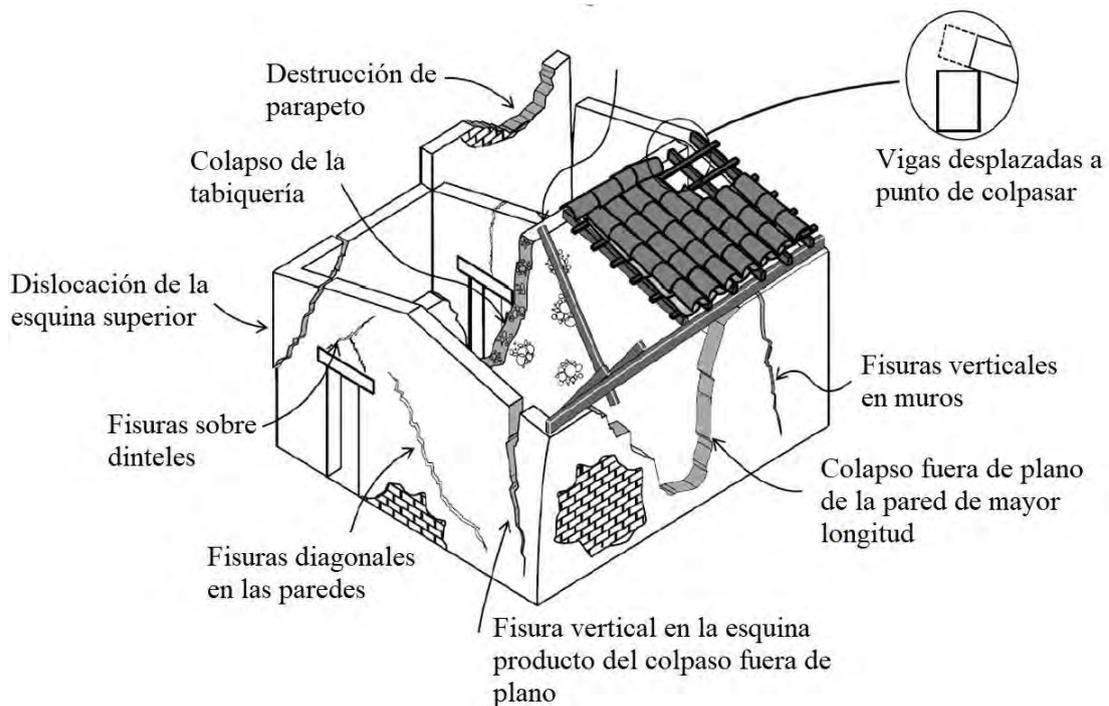


Figura 1.1. Fallas convencionales debido a terremotos en estructuras de tierra (Adaptado, CENAPRED, México, 2000)

El colapso de las construcciones de tierra se debe a un sistema constructivo deficiente y un inadecuado control de calidad en todas las fases de la construcción. Por estas razones, la tierra como material de construcción ha venido siendo estudiada en Perú con el fin de optimizar sus propiedades estructurales y lograr construcciones más resistentes, económicas y duraderas. El inicio de la investigación de la construcción con tierra en el Perú ocurre luego del terremoto de Huaraz en 1970, cuando el Ministerio de vivienda aplicó adobes cuadrados y técnicas de modulación en la reconstrucción de las viviendas afectadas. Desde el año 1972, la Oficina de Investigación y Normalización (OIN), la PUCP y la UNI investigaron sobre nuevos materiales de construcción de tierra y métodos de diseño estructural a las construcciones con adobe. El ININVI (OIN en la década del 70) y la PUCP en 1986 investigaron diferentes tipos de refuerzo en tapial, utilizando caña y madera rolliza de eucalipto. Años más tarde, desde 1995 el ININVI, PUCP, UNI, GTZ, SENCICO, PADT REFORT, USAID, CERESIS han venido desarrollando investigaciones con diversos sistemas de reforzamiento para mejorar el desempeño sísmico de las construcciones de tierra. En conclusión, actualmente existen una variedad de formas de utilizar a la tierra dentro del mundo de la construcción.

El bloque de tierra comprimida (BTC) es una de las tecnologías más innovadoras en el campo de la fabricación de materiales con tierra, el cual fue utilizado desde inicios del siglo XVIII en Francia. Sin embargo, en Perú el uso de BTC no es muy conocido ni utilizado en la construcción de viviendas. El BTC ha sido estudiado por diversos investigadores ya que aprovecha las ventajas de la compactación y la estabilización de la tierra. El proceso de estabilización es una técnica que permite mejorar las propiedades mecánicas de la tierra a través de la adición de sustancias vegetales, minerales, químicas u de otra índole. La presente investigación estudia las propiedades mecánicas de bloques de tierra comprimida estabilizada (BTCE) con dos tipos de sustancias: cemento y geopolímero de puzolana. El cemento es comúnmente aplicado dentro de la estabilización química de suelos, pero produce impactos ambientales negativos. El geopolímero está constituido por puzolana y activador alcalino (hidróxido de sodio y silicato de sodio) y a diferencia del cemento es un material ecosostenible.

La forma del BTC propuesta en la presente investigación consiste en un bloque con la forma de un prisma rectangular, en el cual dos agujeros traspasan el cuerpo, además, posee un sistema endentado en la superficie y en el fondo del bloque que permite la interconexión vertical de las unidades. La forma de los BTC ha sido adaptada del estudio de Sturm (2014) quien los aplicó en el proyecto HiloTec. El proyecto HiloTec fue ejecutado con la contribución de la compañía Mota-Engil S.A. en Malawi, África. El alcance del proyecto fue la construcción de viviendas sociales sismorresistentes en base a bloques de tierra comprimida estabilizada con cemento interconectados (BTCEI) sin la utilización de materiales adicionales para el reforzamiento del sistema constructivo. El uso de BTCEI permite la construcción de mampostería apilada en seco sin uso de morteros gracias al sistema de interconexión hembra-macho que poseen los BTC propuestos en el estudio. El sistema constructivo con BTCEI fue probado en un prototipo de vivienda a escala real, que fue ensayada sobre una mesa vibratoria y donde se registró una aceleración máxima del terreno (PGA) de 0.3g que es equivalente a un sismo de 6.5 de magnitud en la escala de Richter. Durante el ensayo dinámico no se observaron fisuras significativas más sí en la fase final. De las conclusiones del estudio de Sturm (2014) se destacan la resistencia a fuerzas dinámicas de viviendas de BTCEI de hasta 0.3g, además, el bajo costo de la construcción y la sencillez del sistema constructivo.

Bloque de tierra comprimida – BTC

El BTC ha sido utilizado como material de construcción desde inicios del siglo XVIII en Francia. Un típico BTC es una unidad de albañilería fabricada en base a tierra compactada dentro de un molde con forma de un prisma rectangular. La tierra utilizada para la fabricación de BTC ha sido motivo de investigación en diversos estudios, donde la estabilización es el más conocido para mejorar sus propiedades de resistencia mecánica y durabilidad. Los BTC son fabricados en moldes que tienen formas y dimensiones definidas, en los cuales se introduce la tierra estabilizada. La técnica de fabricación de BTC es sencilla y no requiere el empleo de mano de obra calificada, lo cual reduce el costo del material. Además, desde un enfoque eco sostenible, el uso del BTC permite reducir la energía incorporada comparado con la construcción de mampostería de albañilería o concreto armado.

Mampostería apilada en seco

La mampostería apilada en seco se construye en base a bloques de tierra comprimida interconectada (BTCEI). La construcción de mampostería apilada en seco proporciona una ventaja laboral significativa sobre la mampostería tradicional porque el mecanismo de interconexión hembra-macho de los BTCEI permite la construcción de mampostería sin mortero (Jaafar, et al., 2006). El proceso constructivo es sencillo y no requiere del empleo de mano de obra calificada. Se estima que la reducción en el costo de la mano de obra es del 80% debido al aumento de la producción y la facilidad que brinda el proceso constructivo (Anand & Ramamurthy, 2005). El presente estudio está enfocado en impulsar el uso del BTCEI como unidad de albañilería para la fabricación de viviendas sociales en Perú.

1.2. Objetivos

El objetivo de la investigación es estudiar las propiedades mecánicas de bloques de tierra comprimida estabilizada interconectados (BTCEI) con dos tipos de sustancia estabilizante: cemento y geopolímero de puzolana, para su uso en la construcción de viviendas sociales ecosostenibles y resistentes. Los objetivos específicos son los siguientes:

- Determinar la forma y dimensión de los BTC en base a las recomendaciones de investigaciones previas, normativa existente y recomendaciones arquitectónicas.
- Obtener un suelo idóneo para fabricar BTC que cumpla con la normativa existente.

- Definir el porcentaje óptimo de cemento y puzolana en el proceso de estabilización de suelo para fabricar BTC que cumplan con normas, recomendaciones y buenas prácticas a nivel internacional con el menor costo.
- Analizar el comportamiento mecánico del BTCE con cemento y geopolímero de puzolana.
- Analizar el comportamiento mecánico de primas de BTCE con cemento y geopolímero de puzolana para obtener las propiedades de la mampostería apilada en seco.

1.3. Organización

En el Capítulo 1 se presenta la introducción, que trata sobre la importancia de la investigación, los objetivos, la metodología utilizada y de manera resumida, el contenido de la tesis.

En el Capítulo 2 se presenta el estado del arte, donde se desarrolla la evolución de la construcción de tierra en el mundo y en el Perú. Posteriormente se introduce el concepto de los BTC y se desarrolla su evolución a lo largo del tiempo. Finalmente, se presenta la teoría de la estabilización del suelo y las diferentes técnicas aplicadas por los investigadores.

En el Capítulo 3 se presenta la campaña experimental de la investigación donde se explica el protocolo de los ensayos físicos y mecánicos realizados en el presente estudio.

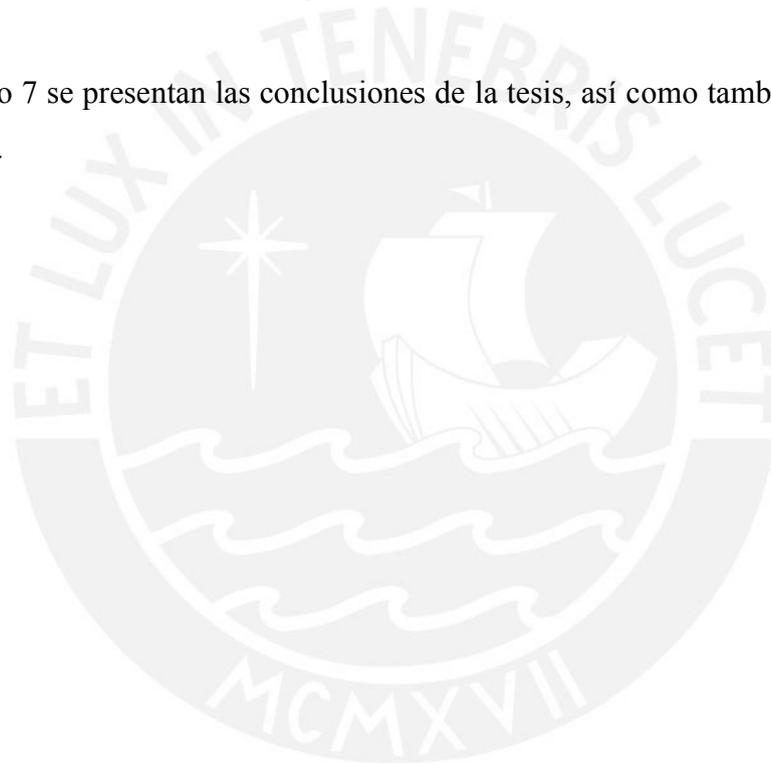
En el Capítulo 4 se detalla el proceso de elaboración de BTC, que sirve como línea base del estudio comparativo. En el capítulo se analiza el suelo base y se realiza el mejoramiento de sus propiedades físicas para fabricar BTC. Además, se presenta la caracterización mecánica de BTC, donde los resultados obtenidos se muestran en términos de resistencia a la compresión y flexión.

En el Capítulo 5 se desarrolla el proceso de estabilización de suelo con cemento y geopolímero de puzolana para fabricar BTC. La caracterización mecánica de los BTC estabilizada y sus resultados son mostrados de la siguiente manera: En primera instancia se describen los materiales utilizados. A continuación, se presenta la estabilización de suelo con distintos porcentajes de cemento y puzolana activada alcalinamente para obtener el contenido óptimo en base al costo y la resistencia mecánica. Posteriormente, se presenta la

caracterización mecánica de los BTC estabilizada, donde los resultados se observan en términos de la compresión y flexión. El capítulo finaliza con la discusión de los resultados obtenidos.

En el Capítulo 6 se presenta la caracterización de la mampostería de junta seca. En este capítulo se desarrolla la descripción de las características de los especímenes utilizados para la caracterización mecánica. Además, se presentan los resultados del ensayo de compresión uniaxial de prismas de BTCs y BTCs estabilizada. Finalmente se desarrolla la discusión de los resultados obtenidos en términos de la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad, el coeficiente de Poisson y el módulo de corte.

En el Capítulo 7 se presentan las conclusiones de la tesis, así como también el futuro de la investigación.



CAPITULO 2. ESTADO DELARTE

Resumen

El presente capítulo inicia con el desarrollo de la evolución de la construcción con tierra en el mundo a través del tiempo. A continuación, se presentan a las construcciones de tierra más emblemáticas en el mundo y en el Perú. Además, se desarrolla la historia de la investigación de las estructuras de tierra en el Perú. Posteriormente, la introducción a la teoría de BTC es presentada, así como su evolución en el tiempo. Se describen temas tales como su historia, la evolución de las máquinas utilizadas para su producción y las tecnologías más recientemente utilizadas. El capítulo finaliza con la teoría de estabilización de suelos, que abarca desde las técnicas más convencionales hasta las más estudiadas por los investigadores contemporáneos.

2.1. La construcción con tierra y su desarrollo en el tiempo

2.1.1. Evolución de la construcción con tierra

Desde el comienzo de la civilización, las construcciones eran levantadas en base a materiales con mayor disponibilidad a la mano del hombre. Los mesopotámicos, por ejemplo, contaban con los depósitos aluviales de los ríos Tigris y Éufrates y los usaban para formar ladrillos y construir sus colonias. Las civilizaciones, que se asentaron en zonas rocosas utilizaron bloques de piedra para levantar sus construcciones, por ejemplo, las pirámides egipcias, que se construyeron a lo largo de las fronteras rocosas del valle del Nilo. Sin embargo, el material de construcción más utilizado desde aproximadamente 9000 años a. C. es la tierra por su accesibilidad, abundancia y bajo costo. Las construcciones de tierra se ubican alrededor de todo el mundo. Aproximadamente el 50% de la población de los países en desarrollo y el 20% de la población urbana y urbano marginal habitan en viviendas de tierra (Houben & Guillaud, 1994).



Figura 2.1: Distribución mundial de construcciones con tierra (De Sensi, 2003)

a) Mampostería de adobe

El adobe es una unidad de albañilería con forma de prisma rectangular macizo, elaborado con tierra y secado bajo el sol. La palabra proviene del egipcio “djobe” que significa masa de barro. En Arabia, la palabra egipcia “djobe” se convirtió en "at-tob", en Francia en "toub" y "adobe" en español (Doat, et al., 1991). El bloque de adobe es una unidad de albañilería fabricado con tierra secado al sol. Las construcciones con adobe datan desde 8000 años a. C. (Houben & Guillaud, 1994) y se ubican mayormente en las regiones del mundo más propensas a desastres naturales, como América Latina, África, el subcontinente de India, el Oriente Medio, el Sur de Europa y algunas partes de Asia (Blondet, et al., 2011).

b) Muros monolíticos de barro

El sistema constructivo es conocido como “coursed adobe” en el suroeste de los Estados Unidos, como “cob” en Inglaterra, como “bourrine” en Bretaña, como “chineh” en Irán y tauf en Arabia (Moquin, 1994). La técnica consiste en construir el muro con la formación de capas delgadas de barro sin el uso de encofrado o moldes. Un ejemplo de la construcción de muros monolíticos de barro es el pueblo de Taos en Nuevo México que data del año 1200 d. C. junto con Acoma y Hopi en el mismo país.

c) Mampostería de tapial

El tapial es una técnica constructiva tradicional que destaca por su estabilidad y dureza. Su uso data hace 5000 años a. C. en Asiria. Su uso ha sido preponderante en España y el norte de África. La técnica consiste en levantar la mampostería con tierra cruda humedecida, amasada, compactada previamente y apisonarla por capas dentro de encofrados móviles. Se le denomina también Tapia o Adobón y es considerado como uno de los sistemas constructivos de tierra sin cocer más convencionales. En los últimos 500 años se han construido monasterios budistas de grandes áreas y con alturas de cuatro a siete pisos, donde los muros más anchos han sido levantados con la técnica del tapial. Este método de construcción todavía se practica en el Tíbet y China (Moquin, 1994). El empleo de esta técnica en el Perú data de épocas preincaicas. Se estima que las construcciones en el Perú con esta técnica comienzan entre el 800 y 1200 d. C. en el valle del Rímac donde se encuentra Cajamarquilla, asentamiento de influencia Huari (Monzon & Oviden, 1990). El proceso constructivo de los muros de tapial empieza con el amasado de la tierra arcillosa húmeda, la cual es compactada con un pistón dentro de un encofrado. El encofrado que se utiliza es de madera o metal. En el proceso se van colocando dos planchas de madera paralelas, entre las que se vierte capas de tierra de espesor de 10000 ó 150 mm, y se compacta a golpes con un pisón. La mampostería se seca bajo el sol y una vez que está compacto las puertas y ventanas se abren con cincel.

d) Domocaña

La aplicación de las cañas de bambú en la construcción se ha dado en Asia, especialmente en la India, China, Java y Japón. Ha habido muchos investigadores peruanos de La Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), el Instituto Nacional de investigación y Normalización de la Vivienda (ININVI) y la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) que han estudiado las propiedades de este material de construcción. Los resultados encontrados muestran que la

caña es un excelente refuerzo para los muros de adobe, dándole así características sismorresistentes dentro de ciertas condiciones. Actualmente la norma NTE E.080 (2017) indica que las viviendas reforzadas con caña deben cuidar su relación de esbeltez.

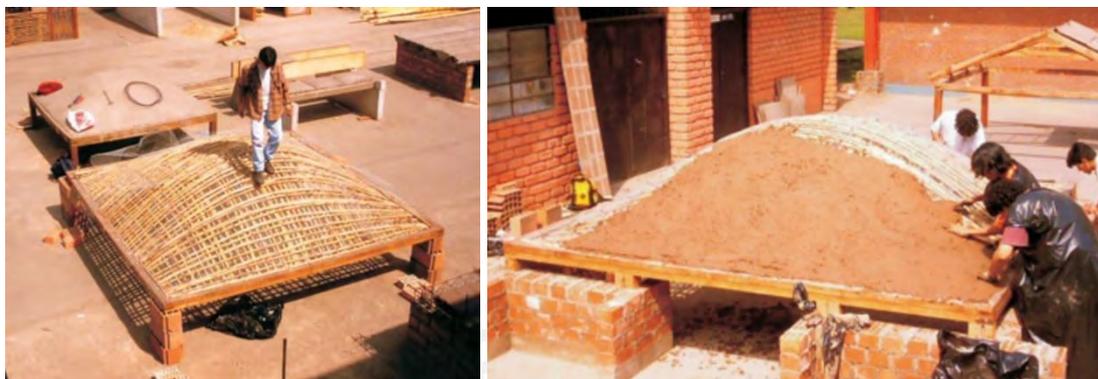


Figura 2.2: Construcción de techo de Domocaña en Moquegua (R. Barrionuevo, 2011)

e) Paneles de tierra estabilizada y fibra de cáñamo

La empresa CANNAPANEL ha lanzado al mercado el año 2010 paneles de tierra con formas y tamaños adaptables a cada proyecto. La principal composición de este material es tierra estabilizada con paja y fibra de cáñamo, lo cual permite que el panel tenga resistencia térmica, una resistencia a la compresión de 1.96 MPa [20 kg/cm²] y una densidad seca de 1000 kg/m³. Su utilización es adecuada para centro comerciales y viviendas. Las especificaciones técnicas del material indican un incremento del confort térmico, acústico y bioclimático.

2.1.2. Las construcciones de tierra más emblemáticas en el mundo

a) Gran Mezquita de Djenné

Es un templo sagrado considerado como una de las construcciones de tierra más emblemáticas por su estética y tamaño. Se encuentra en la región del Sahel, Djenné, Malí. La mampostería es de adobe revestida con una masilla de barro. Tiene una planta de forma trapezoidal de 5600 m² aproximadamente, que se encuentra asentada sobre una plataforma que se eleva 3 m del nivel del suelo. La plataforma se construyó para evitar el daño por el desbordamiento del río Beni. El espesor de las fachadas perimetrales de la mezquita es de aproximadamente un metro y están reforzadas exteriormente por contrafuertes que se rematan con pináculos. La cubierta del edificio se realiza con madera de palma y se reviste con barro. Actualmente, está sometida a supervisión y mantenimiento desde que fue declarado como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 1988 junto con la ciudad

de Djenné. La fundación Aga Khan Trust for Culture se ha hecho cargo de las últimas restauraciones de la mezquita.

b) Civilización de Çatal Hüyük

Es una civilización ubicada al sur de la península de Anatolia, en la planicie de Konya, aproximadamente a 140 km del volcán Hasan Dağı, en Turquía. Su existencia fue descubierta por James Mellaart. Las viviendas de la civilización de Çatal Hüyük se construyeron con una mampostería de adobe común entre dos casas, por tal razón, no existían calles ni pasajes. El acceso al interior de las construcciones era a través de agujeros ubicados en los techos, además, utilizaban escaleras de madera para trasladarse de un nivel a otro. De esta forma, las azoteas de las construcciones servían de espacio público.



Figura 2.3: Construcciones emblemáticas de tierra (a) Gran Mezquita de Djenné (b) Recreación de Çatal Hüyük

c) Ciudadela de Bam

Se ubica en la provincia de Kermán, en el sudeste de Irán. La Ciudadela de Bam abarca un área de aproximadamente 18000 m². Está rodeada por paredes de 6 a 7 m de altura, las cuales poseen una extensión de 1815 m. Todas las construcciones de Bam están asentadas con técnicas de adobe y tapial. Se considera que Bam era la ciudadela con mayor extensión de estructuras de adobe en el mundo, la cual era habitada por 90 mil personas aproximadamente antes del terremoto de Bam en diciembre de 2003, donde fue destruida casi por completo.



Figura 2.4: Ciudadela de Bam

d) **Zigurat Choga Zanbil**

Choga Zanbil es un zigurat que pertenece a la antigua civilización elamita y cuyos restos subsisten cerca de la ciudad de Shush en Irán. Es un templo de la antigua Mesopotamia que tiene la forma de una pirámide escalonada. El núcleo es la parte no expuesta a la intemperie y estaba construido de adobe, mientras que, la parte exterior estaba revestida de ladrillos cocidos. Su construcción data de aproximadamente 1000 ó 500 años a. C.

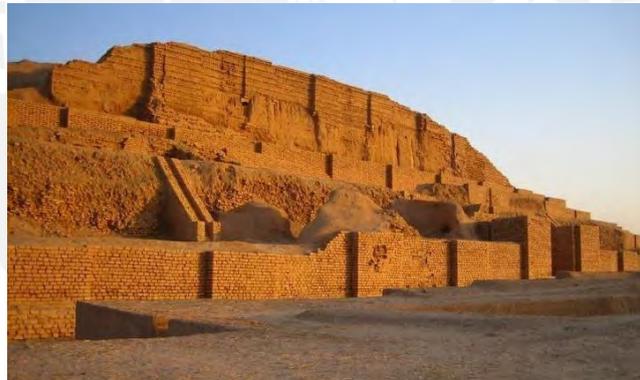


Figura 2.5: Zigurat Choga Zanbil

e) **La gran muralla de China**

La gran muralla de China es una antigua construcción que fue reconstruida entre el siglo V a. C. y el siglo XVI. Fue construida para proteger la frontera norte del Imperio chino durante las sucesivas dinastías imperiales de los ataques de los nómadas *xiongnu* de Mongolia y Manchuria. La estructura tiene 7000 km de largo aproximadamente, que abarca desde la frontera con Corea al borde del río Yalu hasta el desierto de Gobi. La construcción se desarrolla en forma de un arco que delinea el borde sur de Mongolia Interior. Los muros de la construcción fueron construidos con la técnica de tapial según testimonios de pobladores de la provincia china de Gansu.



Figura 2.6: Sección de la Gran Muralla China en el desierto construida con tierra apisonada

2.1.3. Las construcciones de tierra más emblemáticas en el Perú

a) Templo de la Luna o Acllahuasi en Pachacamac

El templo cuenta con 465 ha² de extensión y se ubica a margen derecha del río Lurín a 31 km aproximadamente al sur de la ciudad de Lima. La técnica constructiva, patrón arquitectónico, así como en los materiales empleados para su construcción se presenta la filiación Inca. Los muros de santuario fueron asentados en base a bloques adobe y de rocas canteadas.

b) Ciudadela de Chan Chan

La ciudadela está compuesta por patios, residencias, edificios administrativos, depósitos, corredores, y pozas de agua. La ciudadela se construyó entre los años 850 y 1470 d. C. Las estructuras se asentaron en base a bloques de adobe con sobre cimientos de piedra unidos con barro. Para los pisos se utilizaron adobes fracturados con piedras y otros desechos. La madera se usó para hacer postes, columnas y dinteles. Los techos fueron confeccionados mediante el entretejiendo de atados de paja.

c) Huacas del Sol y de la Luna

Es un complejo arqueológico ubicado en la costa norte del Perú, considerado como un santuario moche constituido por un conjunto de monumentos situados a unos 5 km al sur de Trujillo, en el distrito de Moche. Este sitio arqueológico representó físicamente la capital de la cultura mochica desde el siglo I a. C. hasta el siglo IX. El complejo que data de los años 600 d. C. fue construido en base a bloques de adobe elaborados en moldes. La huaca del sol fue construida con fines administrativos consistente en una pirámide escalonada de unos 43 m de altura. Cuenta con 5 grandes terrazas, donde la mayor es de 80 m de longitud. La estructura cuenta con 228 m de largo por 136 m de ancho, además de una plataforma de

18 m de altura, que está coronada por una pirámide de 23 m de alto, la cual que tiene una base cuadrangular de 103 m de lado. La huaca de la luna tiene una extensión de 6 ha² aproximadamente y destaca por tener templos que fueron superpuestos y construidos en diferentes períodos. Tiene una base cuadrada de 87 m de lado y una altura de 21 m. En su plataforma superior se levantaban una serie de salas decoradas con figuras humanas.



Figura 2.7: Panorámica del Templo de la Luna o Acllahuasi en Pachacamac



Figura 2.8: Parte de la ciudadela de Chan Chan



Figura 2.9: Albañilería tradicional de las Huacas del sol y de la luna



Figura 2.10: Vista general de la huaca del sol y de la luna

2.1.4. Desarrollo de la investigación sobre la construcción con tierra en el Perú

El inicio de la investigación de tierra en el Perú inicia luego del terremoto de Huaraz en 1970. La Oficina de Investigación y Normalización (OIN) utilizó adobes de base cuadrada y criterios de modulación para restaurar las viviendas afectadas por el terremoto. Dos años más tarde, inicia el Programa de Construcción con Bloque Estabilizado (COBE) liderado por la UNI, en el cual se utilizó cañas para reforzar la mampostería. En 1973, la PUCP lideró una investigación sobre el comportamiento estructural del adobe frente a solicitaciones sísmicas, la cual ganó el premio “Sayhuite” otorgado por el Banco Peruano de los Constructores. En 1975 se desarrolló la segunda etapa del proyecto COBE liderado por la

OIN, USAID y CRATerre, donde se aplicaron métodos de diseño estructural a las construcciones con adobe y se brindaron sistemas de refuerzo con caña a las construcciones de tierra existentes. Desde 1986, el ININVI (llamada OIN en la década de los 70) conjuntamente con la PUCP hicieron investigaciones sobre el comportamiento estructural del tapial, la cual tuvo dos partes. La primera parte de la investigación abarcó los tipos de reforzamiento de los tapias utilizando cañas como elementos de refuerzo y también maderas rollizas de eucalipto. En la segunda parte de la investigación se hicieron ensayos en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de Ingeniería de la PUCP, lo que permitió la adquisición de conocimientos del comportamiento dinámico de los muros de tapial.

La OIN pasó a ser ININVI en la década de los 80, esta última fue desactivada en 1995 y su documentación pasó a manos del SENCICO. Ese mismo año la UNI, PADT REFORT y la USAID investigaron sobre el uso de la Quincha logrando su aprobación como sistema constructivo no convencional. Un año más tarde la PUCP, CERESIS y GTZ hicieron un estudio sobre el reforzamiento de las construcciones existentes en los países andinos, la cual tuvo gran aporte al sistema de refuerzos con mallas metálicas electro soldadas.

A partir del 2000, una gran cantidad de investigaciones fueron realizadas en la PUCP, apoyado por entidades nacionales e internacionales como: SENCICO, ININVI, ITINTEC, DAI-PUCP, CONCYTEC, PRODAC, CISMID, ASOCEM, GMI, GTZ, JICA, CERESIS, entre otros. Blondet , et al. (2006) presentaron su estudio sobre los tipos de reforzamiento sísmico en construcciones de adobe usando mallas poliméricas externas en *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*. Tarque, et al. (2010) realizaron un estudio para obtener el modelo numérico del comportamiento en el plano de muros de adobe y los resultados fueron presentados en *8th National Conference on Seismology and Earthquake Engineering*. San Bartolomé & Quiun (2015) desarrollaron una investigación dedicada al diseño de mallas electrosoldadas para viviendas de adobe, cuya publicación se encuentra en la revista de ingeniería de la PUCP. Un años más tarde, Torrealva (2016) dio a conocer los resultados de las pruebas estáticas y dinámicas para validar la malla de polímero para su uso como refuerzo externo en viviendas de tierra. La investigación en estructuras con valor patrimonial, que en su mayoría son de tierra, han sido un foco de atención en los últimos años, Aguilar (2017) estudió sobre las aplicaciones de tecnologías modernas para la evaluar el comportamiento sísmico de las estructuras patrimoniales del Perú cuyos resultados se presentaron en el *16th World Conference on Earthquake Engineerig*. En la actualidad la

tierra como material constructivo sigue siendo una línea de investigación en el Perú a medida que nuevas tecnologías aparecen en el mundo de la construcción.

2.1.5. Normativa existente sobre la construcción con tierra

En la Tabla 2.1. se presentan las normas y reglamentos internacionales vigentes que regulan el diseño y construcción de tierra.

Tabla 2.1. Cuadro de normas de construcción con tierra (*Cid, et al., 2011*)

Año	País	Norma
1979	Perú	NTP 331.201,331,202,331.203
1980	India	IS 2110
1982	India	IS 1725
1985	Turquía	TS 537, TS 2514, TS 2515
1986	Brasil	NBR 8491, 8492
1989	Brasil	NBR 10832, 10833
1990	Brasil	NBR 12025
1992	Brasil	NBR 12023, 12024
1993	India	IS 13827: 1993
1994	Brasil	NBR 10834, 10835, 1086
	Brasil	NBR 13554, 13555, 13553
1996	Regional África	ARS 670-683
	Túnez	NT 21.33, 21.35
1997	Nigeria	NIS 369
1998	Nueva Zelanda	NZS 4297, 4298
1999	Nueva Zelanda	NZS 4299
	Kenya	KS 02-1070
2000	Perú	NTE E.080
2001	Francia	XP P13-901
	Zimbabue	SAZS 724
	Colombia	NTC 5324
2004	EEUU	NMAC, 14.7.4
	Italia	Ley N° 378, 2004
2006	Italia	L.R. 2/06
2008	España	UNE 41410
2009	Sri Lanka	SLS 1382-1, 1382-2, 1382-3
2010	EEUU	ASTM E2392 M-0

2.2. Bloque de tierra comprimida (BTC)

2.2.1. Reseña histórica de los bloques de tierra comprimida

El BTC es utilizado desde principios del siglo XIX. La idea inicial nació en 1803 en Francia, lugar donde se desarrolló la idea de fabricar bloques con tierra compactada en moldes de madera (Maini, 2015). Fue con este material que se construye la ciudad de La Roche-Sur-Yon - Paris. En 1956 se desarrolla la primera versión moderna del molde, denominada prensa CINVA Ram (ver Figura 2.11) la cual fue el resultado de una campaña experimental desarrollada en *Colombian Inter American Housing Center* (CINVA) (Rocha, 2017). Con el inicio de la modernización de la fabricación de BTC la construcción con este material se constituye como una de las tecnologías mejoradas más utilizadas en la construcción con tierra. La clave del futuro de esta tecnología es la compresión del suelo dentro en una prensa a una presión de 2 - 4 MPa. (Sitati & Starovoytova, 2015). Actualmente, este tipo de bloque se conoce comúnmente como "Bloque Rhino" o BTC. (Wheeler 2005).



Figura 2.11: Primer modelo de prensa CINVA Ram

2.2.2. Evolución del proceso de fabricación de los bloques de tierra comprimida

A partir de la creación de la prensa CINVA Ram se han ido generando diversas modificaciones para fabricar BTC de diversas formas y tamaños. La compactación manual era el proceso convencional para la producción de BTC, pero la importancia de industrializar el proceso ha generado la necesidad de colocar un sistema de compactación hidráulica a las prensas de hoy en día. Una gran cantidad de compañías alrededor de todo el mundo fabrican máquinas para producir sus propios tipos de BTC. Las máquinas Aurum Press 3000, Hydraform M7, Soeng Thai Modelo BP6 y EcoBrava, son algunas de las más comercializadas. Las máquinas de BTC utilizan compactación vertical u horizontal para formar y expulsar los bloques. Esta orientación del compactado influye sobre las tolerancias del producto acabado. La tolerancia admitida es de 5 mm. Un bloque que es compactado de

forma vertical tendrá dimensiones estrechas en el plano horizontal, donde su altura puede ser variable según el tipo de máquina, el control de calidad en la fabricación y el tipo de suelo. Por el contrario, un bloque compactado horizontalmente tendrá dimensiones más estrechas en el plano vertical y la longitud será variable.

2.2.3. Máquinas utilizadas para la fabricación de BTC

a) Aurum 3000

La máquina Aurum 3000 es fabricada por Aureka en Tamil Nadu, India. Fabrica BTC mediante compactación vertical y se pueden variar entre 15 moldes para producir 75 tipos de BTC. La mayor parte de BTC fabricados permiten la construcción de mampostería con junta, sin embargo, se pueden producir también BTC con interconexión para apilar mampostería de junta seca. La Figura 2.12 muestra los tipos de bloques fabricados por esta máquina y además la máquina se observa en la Figura 2.13 (a).

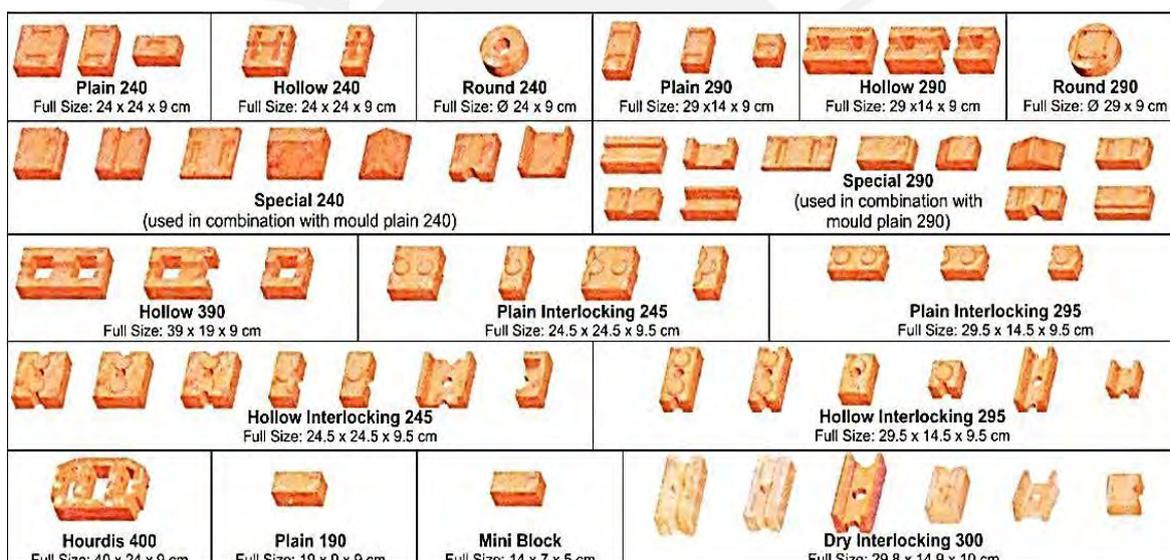


Figura 2.12: Tipos de bloques fabricados por la máquina Aurum 3000

b) HydraForm M7

La máquina Hydraform M7 es fabricada por Hydraform en Johannesburgo, Sudáfrica. La fabricación de BTC en la máquina Hydraform es mediante compactación vertical. Los BTC de la serie Hydraform son usados para mampostería confinada, pero se les puede colocar refuerzo horizontal y vertical haciendo uso de un elemento en la máquina en su proceso de fabricación. Los BTC producidos con esta máquina permiten el enganche vertical y horizontal por el tipo de interconexión que presentan. La Figura 2.13 (b) muestra el modelo de la máquina

c) Soeng Thai modelo BP6

La máquina BP6 de Soeng Thai es fabricada por la CVBT en Tailandia. Posee un sistema de compactación manual para a producción de los BTC, lo que es un descendiente directo de la prensa CINVA Ram. Un típico BTC fabricado por la máquina se muestra en la Figura 2.14, donde se observan las variaciones del bloque que se pueden fabricar. Los orificios sirven para la colocación de refuerzo vertical. Además, los agujeros rectangulares de este tipo de BTC se usan para asegurar la estabilidad de la mampostería y la adecuada distribución de las cargas actuantes, lo cual ayuda a evitar el agrietamiento de los BTC. Las variaciones de estos tipos de BTC permiten la construcción de mampostería apilada seca reforzada.



Figura 2.13: Prensas para fabricar BTC (a) Aurum 300 (b) Hydraform 7

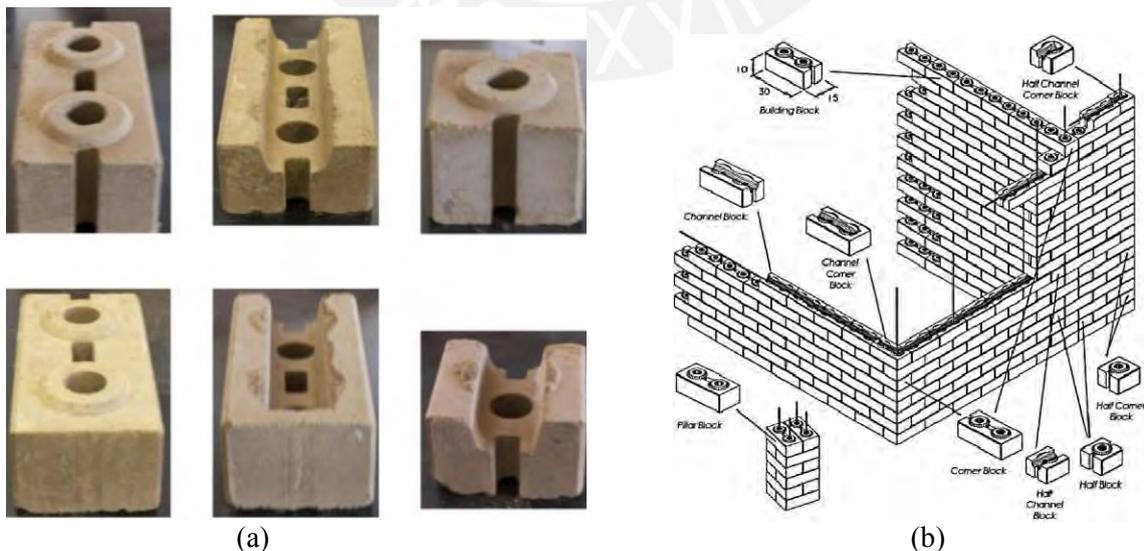


Figura 2.14: Distintos tipos de formas de BTC con sistema de interconexión producidos con la prensa Soeng Thai modelo BP6 (a) (Qu, et al., 2015) (b) (Wheeler 2005)

d) EcoBrava

La prensa EcoBrava es una máquina de operación hidráulica que está controlada por una palanca para fabricar BTC y bloques para pisos y canaletas. La patente de invención de la máquina ha sido concedida en varios países. La dimensión de la máquina es de 950x1050x1850 mm, la cual está compuesta básicamente por tres partes importantes: una tolva que alberga el material usado para la producción de bloques, una caja metálica de molde de bloques, un motor de 12 HP con 5.5 kW de potencia y una palanca de control hidráulico que permite la compactación del material y la expulsión del bloque fabricado. La máquina es fabricada de acuerdo a la necesidad requerida, lo cual permite la fabricación de distintas formas y tipos de BTC y bloques para pisos. La Figura 2.15 muestra el modelo de la máquina EcoBrava y además los tipos de bloques que fabrica.



Figura 2.15: Máquina EcoBrava (a) modelo patentado (b) tipos de bloque fabricados

2.2.4. Normativa existente sobre la fabricación y construcción con BTC

La fabricación, las pruebas requeridas, los requisitos para la construcción de mamposterías y la construcción con BTC están estipulados en normas y reglamentos vigentes. La Tabla 2.2 presenta los documentos hallados.

Tabla 2.2. Normas y reglamentos de BTC por su contenido. Adaptado, (Cid, et al., 2011)

País Grupo	Norma Reglamento	Técnica	Campo de aplicación	Selección	Requisito	Ensayos	Fabricación	Construcción	Diseño	
Regional África 12	ARS670,1996	BTC	Terminología BTC	x						
	ARS674,1996		Requisitos de BTC ordinarios	x	x					
	ARS675,1996		Requisitos aplicables a BTC vistos	x	x					
	ARS676,1996		Requisitos de morteros ordinarios			x				
	ARS677,1996		Requisitos de morteros vistos			x	x			
	ARS678,1996		Requisitos para albañilería revestida						x	x
	ARS679,1996		Requisitos para albañilería vista						x	x
	ARS680,1996		Estado del arte fabricación BTC		x			x		
	ARS681,1996		Estado del arte para morteros de tierra		x			x		
	ARS682,1996		Estado del arte para construcción						x	
ARS683,1996	Pruebas requeridas			x	x					
Sri Lanka 13	SLS 1382-1:2009	BTC	Requerimientos	x	x					
	SLS 1382-2:2009		Métodos de ensayo			x				
	SLS 1382-3:2009		Guía sobre producción, diseño y construcción				x	x	x	
Túnez 14	NT 21.33:1996	BTC	Especificaciones para BTC ordinarios, características geométricas, físico químicas, entre otras		x	x				
	NT 21.35:1996		Definición y clasificación de BTC			v				
España 23	UNE 41410	BTC	Guía sobre producción, diseño y construcción	x	x	x	x	x		

2.2.5. Ensayos experimentales realizados para el estudio del BTC

La importancia de conocer las propiedades mecánicas del BTC y su comportamiento permiten deducir la resistencia y durabilidad de las estructuras construidas en base a este material.

a) Ensayos mecánicos en BTC

El esfuerzo a la compresión ha sido una característica básica y universalmente aceptada para medir la calidad de las unidades de albañilería (Morel & Pkla, 2002). Heathcote (1991), estudió BTC estabilizada con cemento para evaluar los efectos de los tipos de suelo, el contenido de cemento y el efecto de la densidad en la resistencia del producto. Con los

resultados encontrados en su investigación, planteó una fórmula simple para predecir la resistencia a la compresión del BTC en base al contenido del cemento y la densidad del BTC. La fórmula no considera el contenido de arcilla del suelo, por lo cual no puede ser usada en estos casos sin un trabajo adicional.

Browne (2009), obtuvo 2.0 MPa de resistencia a la compresión en unidades de albañilería fabricadas manualmente. Además, indica que, debido al registro histórico de datos, se considera que si el bloque tiene por lo menos una resistencia a la compresión de 2.0 MPa su utilización es completamente aceptada para viviendas sociales de bajo costo. Heath, et al. (2009), realizó pruebas en BTC con distintos contenidos de humedad, donde obtuvo que si el bloque sufre un incremento de su contenido de humedad hasta un 6% la resistencia a la compresión disminuye hasta la mitad.

Sturm (2014) estudió la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos elaborados con dos tipos de suelo estabilizados con cemento. Obtuvo resultados de 1.10 MPa y 2.31 MPa a los 28 días de edad para dos tipos de suelo. Según el código de Nueva Zelanda 4298 (1998) la resistencia a la compresión de los BTC estabilizada con cemento mejora en proporción al esfuerzo de compactación y al contenido de cemento y se reduce por el aumento del contenido de humedad y el contenido de arcilla.

La resistencia a la compresión y el módulo de rotura mínimos son especificados en la normativa vigente, lo cuales son parámetros utilizados para la aceptación de los BTC como unidad de albañilería (ver Tabla 2.3 y Tabla 2.4).

Tabla 2.3. Resistencia a la compresión mínima requerida según diversas normas

Norma	Año	Esfuerzo (MPa)	Condición	Tiempo de curado
NZS 4298	1998	2.2	No especifica	28 días
HB 195	2002	1.0 - 25.0	Curado	No especifica
UNE 41410	2008	1.3; 3.0; 5.0	Curado	No especifica
E-080	2017	1.0	Curado	No especifica

Tabla 2.4. Módulo de rotura mínimo según la normativa vigente

Norma	Año	Módulo de rotura [MPa]
NZS 4298	1998	0.3
HB 195	2002	0.1 - 4.0

b) Ensayos mecánicos del sistema de mampostería de BTC

Bei & Papayianni (2003), estudiaron el efecto del suelo y la mezcla de diferentes proporciones de arena sobre la resistencia a la compresión. Se ensayaron prismas, doblete y triplete con relación de h/t_p de 1.4 y 2.2 respectivamente, y muretes con dimensiones de 800 mm de ancho, 770 mm de altura, y 120 mm de grosor. La construcción de los especímenes fue utilizando un mortero de suelo - cemento de 10 mm. El tipo de falla en compresión depende de la relación h/t_p . Para los prismas de bloques de doblete y triplete, el tipo de falla es similar a la trituración observada de mampostería con forma de reloj de arena. En cuanto a la deformación de la mampostería de BTC bajo carga de compresión es no lineal con muy poco comportamiento elástico.

Perera & Jayasinghe (2003) llevaron a cada un estudio para evaluar el comportamiento de esfuerzo – deformación, el primer modo de falla y la resistencia a la compresión de 20 paneles de BTC cargados axialmente. Las variables fueron el contenido de finos del suelo (20% - 45%) y el contenido de cemento (2% - 8%). El estudio determinó que la resistencia a la compresión de los BTC, varían respecto al contenido de finos del suelo utilizado (debajo del 30%), del contenido de cemento (varía entre el 4% y el 8%) y de la fuerza de compactación.

Pave (2007) llevó a cabo un estudio del sistema Hydraform que permite la construcción de mampostería de junta seca. Las variables fueron el contenido de cemento y humedad. La densidad de compactación de los bloques fue verificada con cubos cortados de los BTC fabricados con la máquina Hydraform. La investigación encontró que el uso de bloques de media y esquina serían más susceptibles a fallas. Los autores encontraron una relación directamente proporcional de 0.3 entre la resistencia de la mampostería de los sistemas de pila seca es directamente proporcional a la resistencia de las unidades de albañilería. La falla del sistema Hydraform apilados con junta seca por la carga a compresión se presentó en forma de grietas verticales en el centro.

Bales et al. (2009) desarrollaron un estudio para determinar las propiedades de BTC que influyen en las propiedades de la mampostería al corte. El estudio se llevó a cabo con diferentes tipos de suelo estabilizado con cemento. Los autores evaluaron las propiedades de la durabilidad y resistencia a la compresión de BTC en estado seco y saturado. Una vez desarrollada una mezcla de suelo idóneo, se ensayaron unidades de BTC a compresión (f^b)

y de prismas de 3 BTC apilados con junta seca. Los autores concluyeron que los prismas eran la manera más efectiva para determinar la resistencia a la compresión (fm).

2.2.6. Procedimiento constructivo de viviendas de BTC

El procedimiento constructivo de viviendas de BTC fue extraído del manual del proyecto HiloTec, que fue desarrollado por Sturm (2014) y la empresa Mota Engil en Malawi, África. El manual fue elaborado luego de obtener resultados satisfactorios de la respuesta del prototipo de vivienda de BTC sometido a aceleraciones de 0.2 g y 0.4 g. El manual detalla cada paso de la construcción, desde la selección del suelo hasta la producción de BTC y desde las cimentaciones hasta la instalación del techo. La construcción de una vivienda con BTC se divide en etapas.

a) Primera etapa

La tercera etapa consiste en verificar la idoneidad del suelo de construcción mediante una caracterización física.

b) Segunda etapa

La segunda etapa consiste en la fabricación de los BTC. En la Figura 2.16 se observa el proceso de fabricación de las unidades en seis etapas.

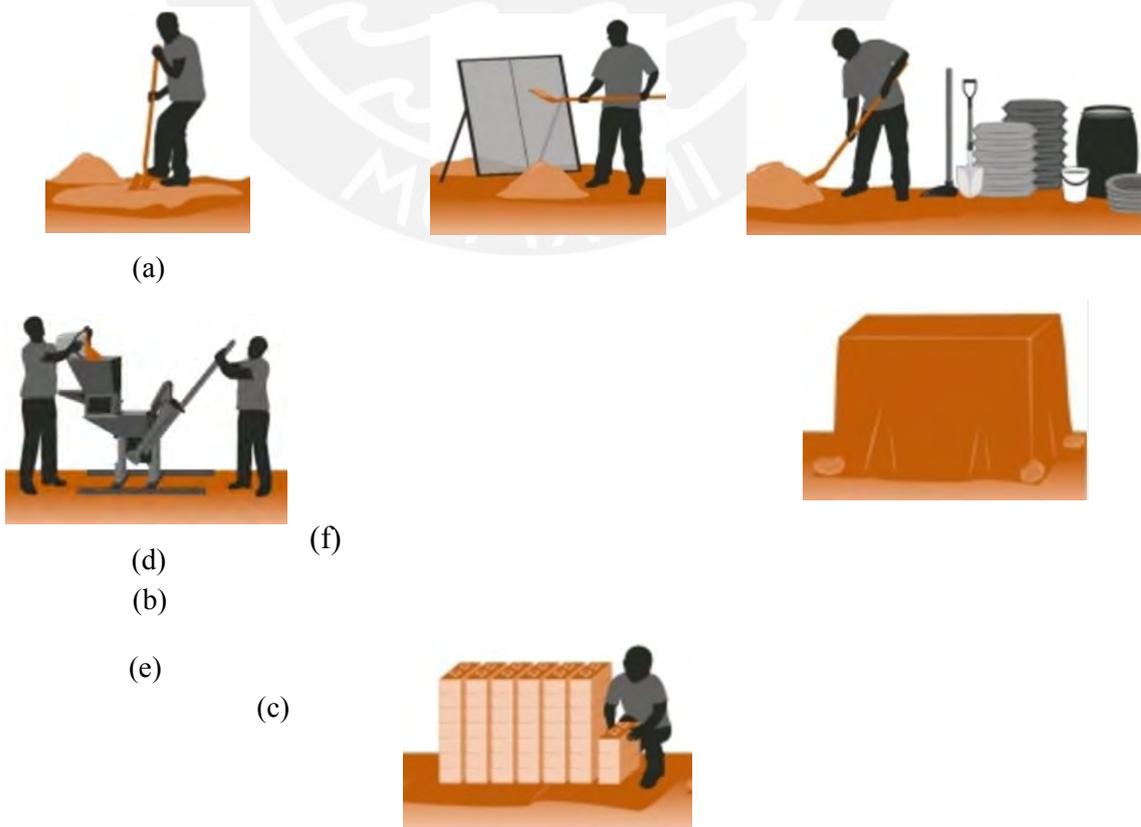


Figura 2.16: Proceso de fabricación de los BTC a pie de obra (T. Sturm, 2014)

- a) Preparación de la tierra
- b) Tamizado de la tierra a través de un tamiz de 5mm
- c) Mezclado de la tierra con cemento donde se recomienda hacer la prueba del bolillo
- d) Colocación del material en la máquina
- e) Apilamiento de los BTC frescos
- f) Curado de los BTC herméticamente



c) Tercera etapa

La cuarta etapa consiste en la nivelación del terreno y la construcción de la cimentación, donde se recomienda que las longitudes de la construcción no sean mayores a 8 metros y además respetar los detalles de construcción mostrados en la Figura 2.17.

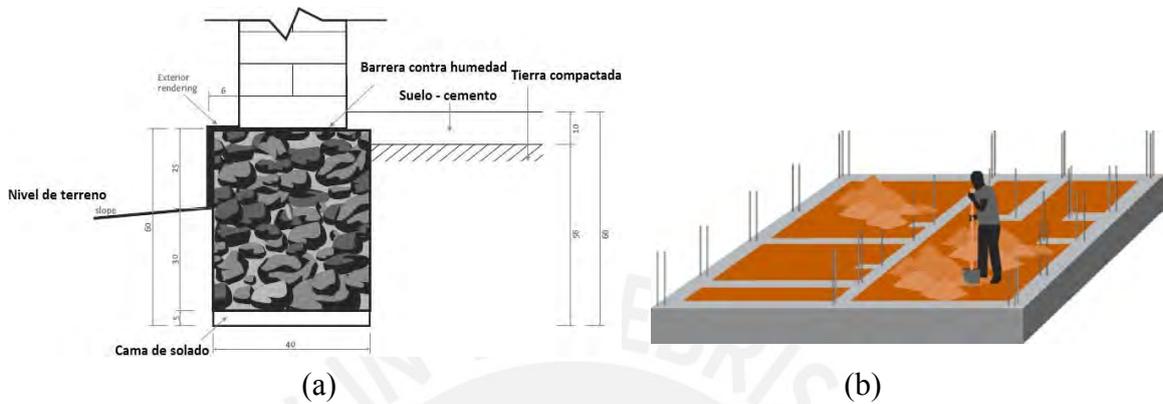


Figura 2.17: Detalles de la construcción de la cimentación (T. Sturm, 2014)
(a) Detalles del sobrecimiento (b)

d) Cuarta etapa

La quinta etapa consiste en asentar los muros, donde la primera hilada es la más importante. La colocación debe ser lo más exacta posible, lo que ayudará a un buen asentamiento de los bloques superiores, con lo cual se evitarán grietas y ayudará al paso de barras de acero a través de los agujeros. Se deben colocar muros de doble fila en los muros exteriores. En las partes marcadas con negro de la Figura 2.18 (a) se deben colocar refuerzos. En la Figura 2.18 (b) se observan el tipo de encuentro que deben tener los muros apilados en una sola capa o simples. En la Figura 2.18 (c) se detalla el apilado de muros de doble capa, donde en cada quinta hilada se debe asentar una hilada de cabeza. En la Figura 2.18 (d) se muestra el tratamiento de orificios de los BTC, los cuales son rellenados con bolsas de cemento.

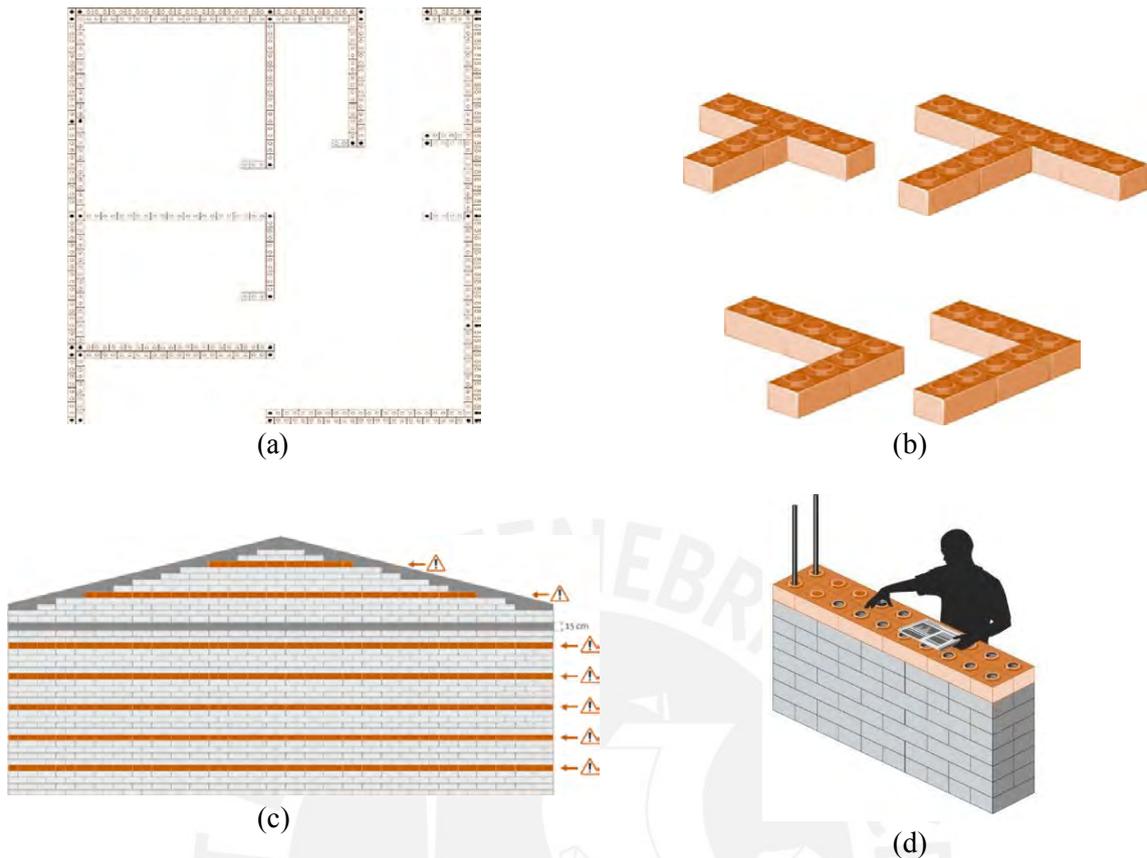


Figura 2.18: Apilado correcto de muros (T. Sturm, 2014)

(a) Asentado correcto de muros de BTC (b) Encuentro de los muros simple (c) Armado correcto de mampostería doble capa (d) Sellado de cada orificio, que no contenga refuerzo, con papel periódico para ahorrar cemento.

e) Quinta etapa

La quinta etapa consiste en construir el techo de la vivienda. Se debe construir una viga de concreto armado sobre la última hilada del muro. (ver Figura 2.19 (a) y Figura 2.19 (b)). Para obtener un plano inclinado se debe nivelar la última fila con mortero de cemento. A continuación, se deben hacer agujeros de 10 mm inclinados en las vigas en los lugares donde pasarán las barras de acero. Una vez colocadas las vigas, las barras de acero se doblan para formar un gancho. Finalmente, colocar las correas en dirección perpendicular a las vigas. (ver Figura 2.19 (c)).

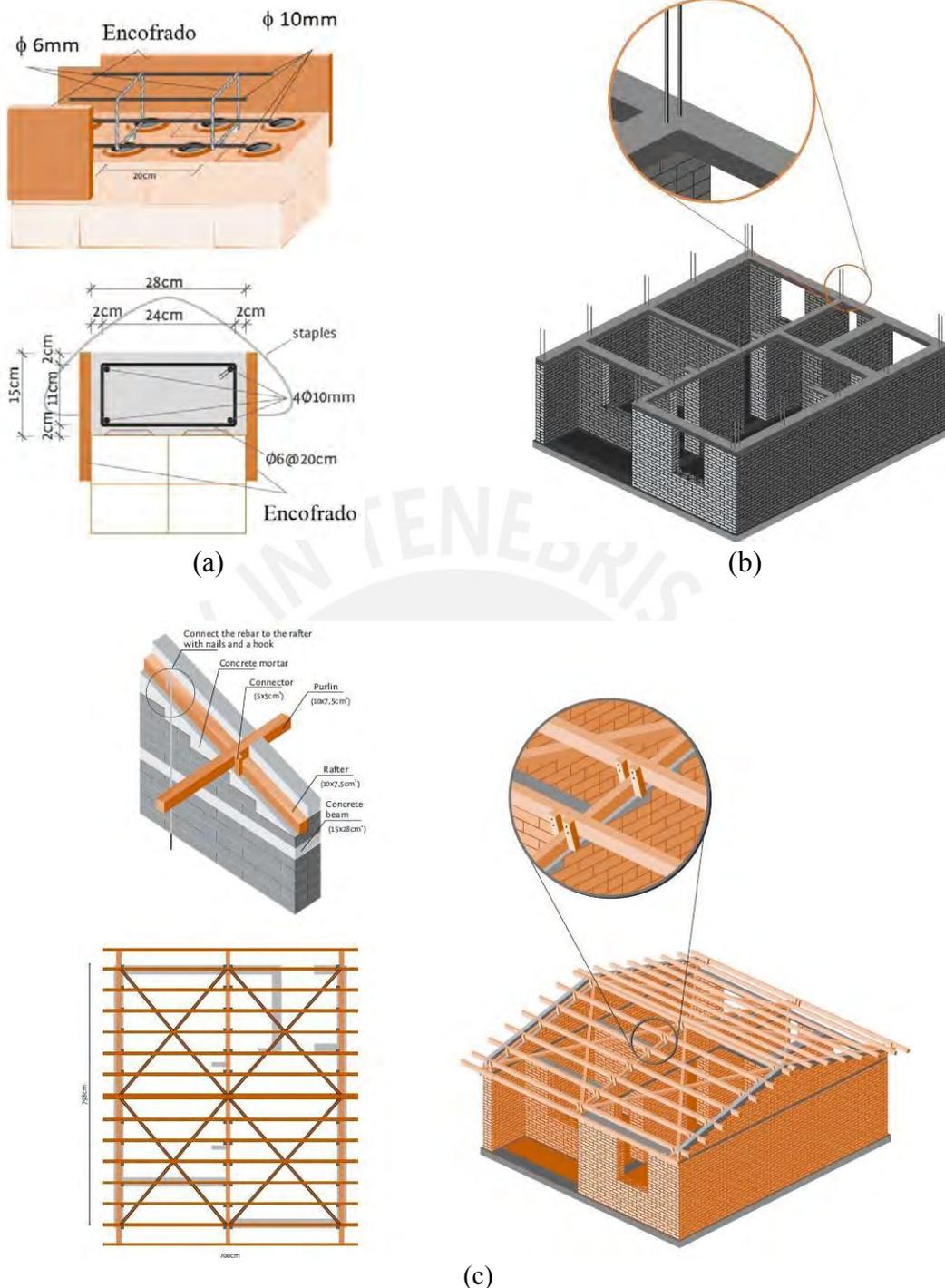


Figura 2.19: Colocación del techo de la vivienda (T. Sturm, 2014)

- (a) Detalles para la construcción de la viga collarín de concreto armado (b) Detalle de la viga de concreto armado sobre la estructura completa (c) Detalles de la colocación de la estructura del techo

2.3. Estabilización química del suelo como material de construcción

El uso de la tierra químicamente estabilizada es una práctica convencional. En la actualidad existen una gran cantidad de sustancias que cumplen la función de agente estabilizador y la elección de uno depende de su disponibilidad en el mercado, sus características físico-

químicas y el costo que representa su utilización. Existen una gran cantidad de investigaciones que han estudiado el efecto de estabilizadores minerales, vegetales y químicos sobre las propiedades mecánicas del suelo, donde en la mayoría de casos los resultados han sido muy satisfactorios.

2.3.1. Estabilización de suelo con cemento

El cemento como agente estabilizante es aplicado y estudiado con frecuencia. El cemento Portland es usado mayormente en el proceso. Los principales componentes del cemento Portland son el silicato tricálcico (3CaO-SiO_2) y el silicato dicálcico (2CaO-SiO_2), los cuales son conocidos también como silicato cálcico hidratado, calcio hidratado, cemento hidráulico, entre otros. El incremento de la resistencia de los materiales que contienen cemento, depende de su reacción con el agua y de la cristalización que se forma en el proceso de hidratación. La ecuación (2.1) muestra a la variable “n” que depende del contenido de agua, que denota que los enlaces de silicato cálcico hidratado depende del óxido de silicio (SiO_2) y del consumo de agua.



Los beneficios de la estabilización de suelo con cemento Portland son aprovechados en la fabricación de BTC. El porcentaje varía de acuerdo al tipo de suelo utilizado como materia prima. Chan & Low (2010), realizaron pruebas experimentales con probetas cilíndricas de suelo estabilizado con cemento, donde obtuvieron una resistencia a la compresión (f'_c) entre 1.20 MPa y 1.39 MPa para suelos con 5% de cemento y de 2.16 MPa a 2.67 MPa para 10%. Por otra parte, Sturm (2014), realizó ensayos de compresión en unidades de BTC estabilizada con 5% y 9% de cemento en peso en dos tipos de suelo. El BTC estabilizada con 5% de cemento alcanzó una resistencia a la compresión de 1.96 MPa, mientras que, el BTC estabilizada con 9% de cemento alcanzó 3.06 MPa a los 28 días de edad. Además, según el registro de Sitati & Starovoytova (2015) realizaron ensayos de compresión en unidades de BTC estabilizada con 12% de cemento en peso a los 28 días de edad que alcanzó una resistencia de 8,24 MPa.

2.3.2. Estabilización de suelo con geopolímeros

El término geopolímero fue acuñado por Davidovits (1980) para agrupar a los polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos (o aluminosilicatos inorgánicos) que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización. Los geopolímeros basados en aluminosilicato ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$) son llamados polisialatos (ver Figura 2.20). La reacción de polimerización se produce bajo condiciones altamente alcalinas entre un elemento que contiene aluminosilicato (precursor) y una solución activadora (activador alcalino). La solución activadora esta compuesta por una solución de hidroxido de sodio (NaOH) con determinada molaridad y un silicato alcalino (silicato de sodio, silicato de potasio, etc.).

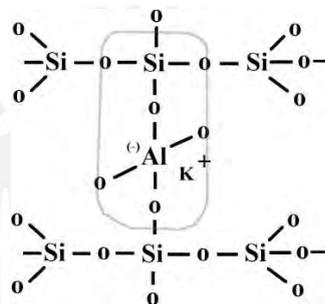


Figura 2.20: Red sialato (silico-oxo-aluminato) que consiste en tetraedros de SiO_4 y AlO_4 unidos por átomos compartidos de oxígeno

Los geopolímeros son mayormente usados como sustitutos del cemento portland. Entre las ventajas de su uso se encuentran la baja emisión de CO_2 en su producción, resistencia química y térmica y buenas propiedades mecánicas. Silva, et al. (2014), estudió el comportamiento mecánico de unidades y prismas de BTC estabilizada con geoolímero de fly ash activado alcalinamente. La campaña experimental se llevó a cabo con 10% y 15% de agente estabilizante, donde se obtuvo resultados a la resistencia a la compresión de 8.8 MPa y 12.0 MPa respectivamente.

2.3.3. Estabilización de suelo con otros agentes estabilizantes

Sitati & Starovoytova (2015), afirman que los agentes estabilizadores más comunes son el cemento, cal, yeso y el betún. Los productos de origen animal, vegetal, los productos artificiales y las fibras son también utilizados como estabilizadores mecánicos. Se ha documentado la eficacia del uso de fibras naturales como agente estabilizador o reforzante en la construcción de la tierra. Además, se ha documentado sobre estabilizadores vegetales como las pajas y cáscaras (trigo, centeno, cebada, arroz, etc.) además de fibras vegetales como sisal, cáñamo, pasto elefante, coco y bagazo.

Yetgin et al. (2008) y Galán-Marín et al. (2010), estudiaron el efecto de fibras naturales como agente estabilizador en el comportamiento mecánico del suelo. Se determinó resistencias a la compresión entre 2 MPa y 3.5 MPa ensayados en probetas cúbicas. Además, estudiaron suelo estabilizado con polímeros, donde se obtuvieron resistencias entre 2.2 MPa y 4.4 MPa en especímenes rectangulares. Cabe resaltar que, las probetas cúbicas y rectangulares son conocidas por mostrar mejores resultados a la compresión que las probetas cilíndricas.

Marwan & Uddin (2015), estudiaron el efecto del uso de fibras de plátano en la fabricación de BTC para evaluar su resistencia a compresión y flexión. En el estudio se encontró que las muestras reforzadas con fibras de 50 mm se comportaron mejor tanto en flexión como en compresión respecto a las muestras no reforzadas y a los especímenes reforzados con fibras de 25 mm. La resistencia a la flexión y compresión incrementaron en 94% y 77% respectivamente en los especímenes reforzados con fibras de 50 mm al 0,35% en peso respecto a las muestras no reforzadas. Paralelamente, Sitati & Starovoytova (2015) usaron 0.75% de sisal en peso como estabilizante de BTC alcanzando una resistencia a la compresión de 9,14 MPa a los 28 días

Zamer et Al. (2016) experimentaron la fabricación de BTC con bacterias ureolíticas (BU), las cuales incrementan la resistencia mecánica y las propiedades de absorción. El resultado de la resistencia a la compresión incrementó en un 15% respecto a un espécimen de control y una reducción del 15% en la absorción de agua, con la adición del 5% de BU.

CAPITULO 3. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Resumen

La campaña experimental de la presente investigación se llevó a cabo en cuatro fases: i) caracterización física del suelo, ii) caracterización mecánica del BTC, iii) caracterización mecánica del BTCE con cemento y geopolímero de puzolana, iv) caracterización mecánica del sistema de mampostería con BTC interconectados. En cada fase experimental se realizaron distintos tipos de ensayos, entre físicos y mecánicos. El objetivo del presente capítulo es describir la normativa y el protocolo de los ensayos realizados en las cuatro fases de la campaña experimental. Los ensayos físicos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos (LMS) y los ensayos mecánicos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras de Ingeniería (LEDI) de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

3.1. Ensayos para la caracterización física del suelo

3.1.1. Contenido de humedad

El ensayo se realizó en base a los lineamientos de la norma ASTM D2216 (2010). El contenido de humedad del suelo es un parámetro obligatorio en la caracterización física del suelo y se utilizó para establecer una relación entre su comportamiento y sus propiedades mecánicas.

3.1.2. Análisis granulométrico

El procedimiento del ensayo, el registro de datos y los cálculos se realizan en base a la norma ASTM D422-63 (2007). En la Figura 3.1 se muestran los dos tipos de análisis granulométrico realizado. El método de tamizado fue utilizado para analizar las muestras retenidas en la malla N°200. Mientras que, el método del hidrómetro se utilizó para el análisis de las muestras de suelo que pasan por la malla N°200. Los tamices estándar utilizados fueron aquellos comprendidos desde la malla 3/8" hasta la N°200. Es importante mencionar que los resultados del análisis granulométrico fueron apoyados en la recopilación de recomendaciones que Sturm (2014) realizó sobre la granulometría de suelos adecuados para la construcción (ver Tabla 3.1) y de la norma UNE 41410 (2008).

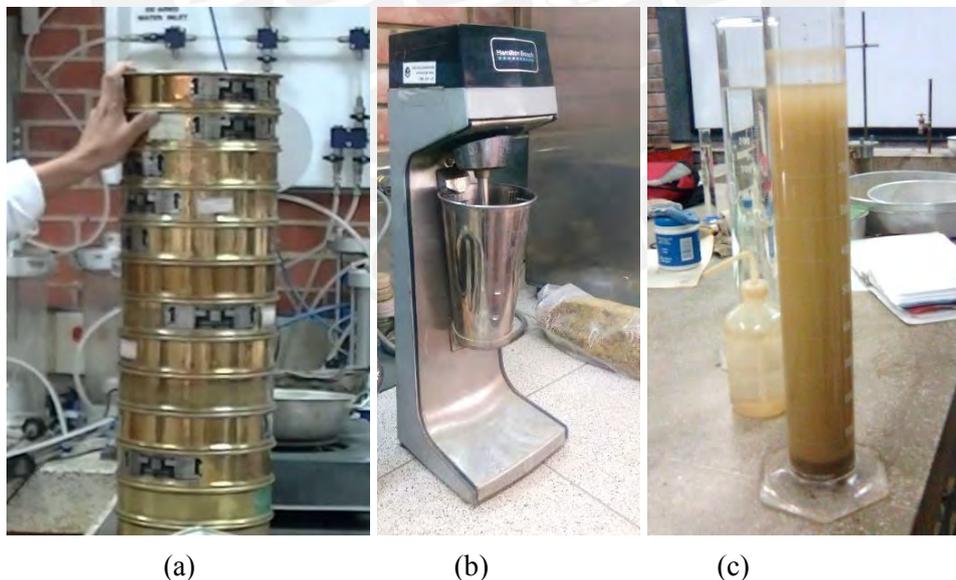


Figura 3.1: Ensayo de granulometría (a) Tamices para el análisis granulométrico de las muestras retenidas en la malla N°200 (b) Dispersión de la muestra que pasa la malla N°200 con hexametafosfato de sodio (c) Probeta contenida con la muestra que pasa la malla N°200 dispersada para realizar las lecturas con el hidrómetro

Tabla 3.1. Composición recomendada de suelos aptos para la construcción

Tipo de grano del suelo	HB 195 (2002)	NZS 4298 (1999)	Rigassi (1985)	Doat et. Al
Arcilla (%)	5 - 25	5 - 50	8 - 30	15-18
Limo (%)	10 - 30	20 - 55	10 -25	10-28
Arena y Grava (%)	45 - 80	45 - 80	25 - 80	55-75

3.1.3. Límites de consistencia

Los límites líquido y plástico se utilizaron para caracterizar la fracción fina de los suelos con el fin de predecir su comportamiento en términos de compresibilidad, y compactabilidad. Cuando el límite líquido es un valor alto significa que el suelo tiene gran capacidad de retención de agua, lo cual es una propiedad de las arcillas. Mientras que, el límite plástico es el porcentaje de humedad en que el suelo pasa del estado elástico al estado plástico. La pérdida de plasticidad del suelo indica una cantidad insuficiente de arcilla (Silva, et al., 2014), lo cual es un indicador que es inadecuado para fabricar BTC. Por otra parte, el rango de valores de límites de consistencia para suelos estabilizados es: límite líquido <45% y límite plástico <18% (Toirac, 2008). El ensayo se elaboró haciendo uso de la Cuchara de Casagrande siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D4318 (2017).

3.1.4. Gravedad específica del suelo por el picnómetro de agua (Gs)

El peso específico se obtuvo mediante la relación entre el peso de sólidos de la muestra de suelo y el volumen de agua que este desaloja a temperatura ambiente utilizando una corrección por temperatura de la norma ASTM D854 (2014). El valor del peso específico intervino en el cálculo de la densidad seca de compactación y el procedimiento del ensayo se realizó de acuerdo a los lineamientos de la norma ASTM D854 (2014) (ver Figura 3.2(b)).

3.1.5. Ensayo de compactación Proctor Estándar

El ensayo se realizó de acuerdo a la norma ASTM D698 (2012). La densidad seca de compactación que se encuentra en el rango de $1650 \text{ kg/m}^3 < \gamma_d < 1760 \text{ kg/m}^3$ corresponde a un suelo con bajo desempeño (Doat, et al., 1991), lo que es importante para predecir el comportamiento del suelo caracterizado. El ensayo Proctor puede ser estándar o modificado y se diferencian en el esfuerzo de compactación que ofrece cada uno. Debido a que, la máquina utilizada para la fabricación de BTC ofrece una compactación aproximada de 4 MPa el tipo de ensayo elegido es el proctor tipo estándar (ver Figura 3.2(c)).

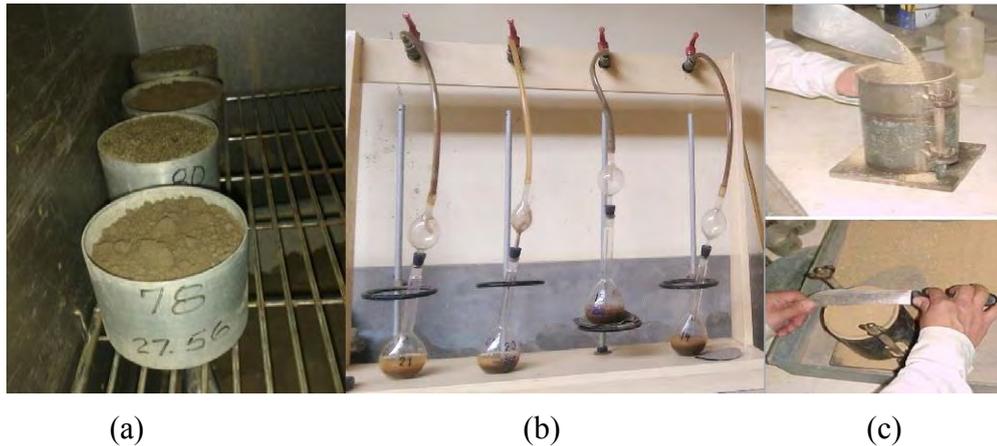


Figura 3.2: Ensayos para la caracterización física del suelo (a) Proceso para determinar el contenido de humedad (b) Eliminación del aire atrapado en la bomba de vacío para determinar el peso específico de suelos (c) Ensayo de proctor estándar

3.2. Ensayos para la caracterización mecánica de BTC y del sistema de mampostería

3.2.1. Ensayo de compresión de unidades de BTC

El ensayo de compresión se realizó siguiendo los lineamientos de la norma EN 772-1 (2011). La máquina utilizada para el ensayo es la máquina universal MTS 810-Test que cuenta con un sistema hidráulico que permite la realización de ensayos convencionales de compresión, tracción y fatiga bajo un control de desplazamiento o de fuerza. La carga es aplicada por medio de una celda de carga con capacidad de 250 kN y contiene un cilindro independiente con capacidad de 100 kN. El ensayo se realizó mediante la aplicación constante de la carga bajo un control de desplazamiento a una velocidad de 1mm/min. Las muestras de ensayo corresponden a BTC y BTCE con cemento y geopolímero de puzolana de 280x140x75 mm. Las superficie inferior y superior de las muestras de ensayo que están en contacto con los platos de acero de la prensa hidráulica se enrasaron para buscar la uniformidad de la aplicación de la carga. Adicionalmente, se colocó un capeo de triplay de 5 mm de espesor. Las superficies de contacto resultante fueron paralelas entre sí y perpendiculares al eje vertical del transmisor de carga del equipo (ver Figura 3.3). Finalmente, el esfuerzo de compresión (f'_b) se calculó mediante la ecuación (3.1), donde, P es la carga máxima registrada en N y A es el área de contacto del BTC en mm^2 . La variación de los resultados es mostrada en términos del coeficiente de variación (CV) el cual es calculado mediante la ecuación (3.2), donde, S es la desviación estándar y \bar{X} es el promedio ponderado de los resultados.

$$f'_b = \frac{P}{A} \quad (3.1)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3.2)$$

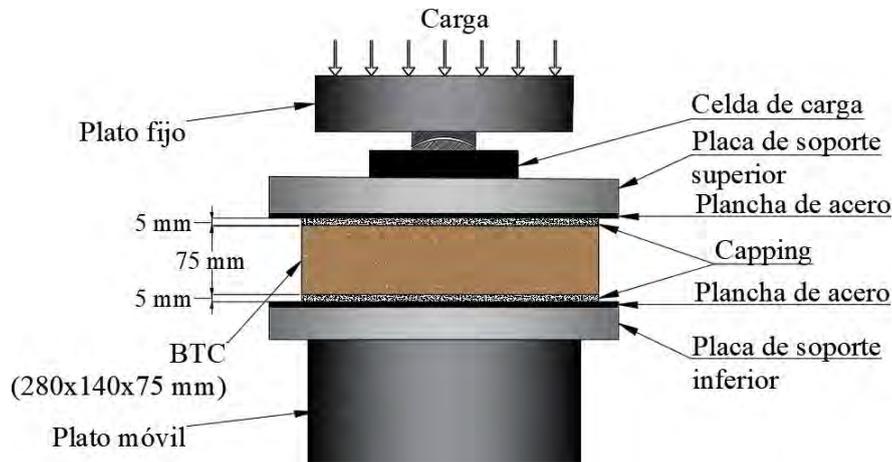


Figura 3.3: Configuración del ensayo de compresión de BTC (280x140x75 mm)

3.2.2. Ensayo de flexión en tres puntos de unidades de BTC

El objetivo del ensayo de flexión en tres puntos fue determinar la resistencia a la flexión (f_r) conocido también como módulo de ruptura (MOR) de los BTC y BTCE con cemento y geopolímero de puzolana. El ensayo se realizó en base a los lineamientos de la norma BS EN 772-6 (2001). Sin embargo, la configuración del ensayo se ha adaptado al ensayo de flexión en tres puntos realizado por Sturm (2014) debido a que la norma europea no considera el tamaño de la muestra correspondiente al BTC de esta investigación. El equipo que se utilizó es la máquina universal MTS 810-Test, el mismo que se utilizó para el ensayo de compresión. Las muestras de ensayo son BTC y BTCE con cemento y geopolímero de puzolana, los cuales fueron colocados horizontalmente sobre dos polines de 30 mm de diámetro cada uno. La luz libre entre los dos apoyos es de 220 mm presentando una relación de luz/peralte de 2.9 como se muestra en la Figura 3.4. La carga vertical uniformemente bajo un control de desplazamiento a una velocidad constante de 0.25 mm/min. Finalmente, el MOR (f_r) se calculó mediante la ecuación (3.3) donde, l_s es la luz libre entre apoyos, F_{max} es la carga máxima, b es el ancho del espécimen y H es la altura del espécimen. La variación de los resultados es mostrada en términos del coeficiente de variación (CV).

$$f_r = \frac{3 l_s F_{max}}{2 b H^2} \quad (3.3)$$

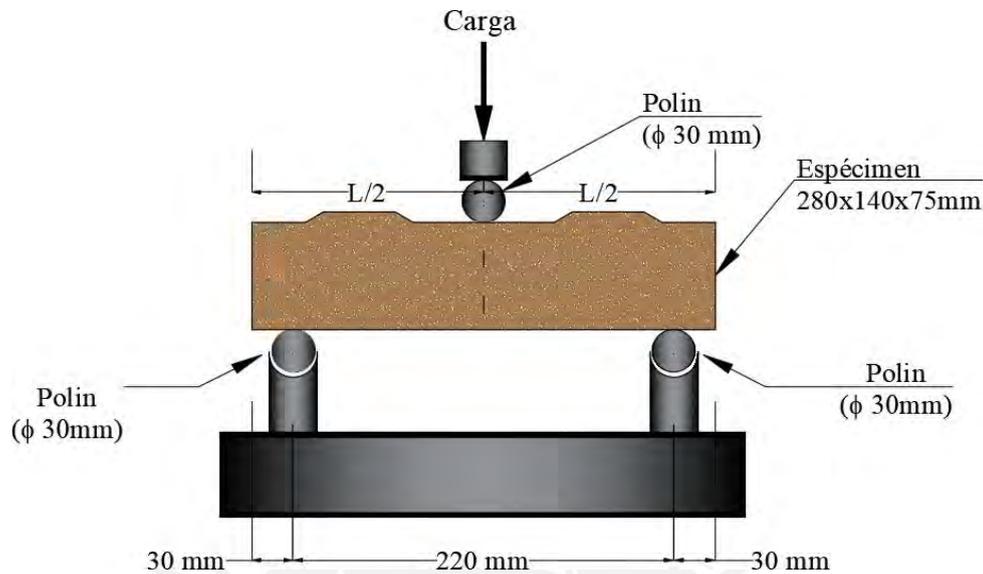


Figura 3.4: Configuración del ensayo de flexión en tres puntos

3.2.3. Ensayo de compresión de prismas de BTC con junta seca

El ensayo de compresión de prismas de BTC se realizó según los lineamientos de la norma ASTM C1314-3b (2003). Las muestras de ensayo son pilas de cinco unidades de BTC de base de 280x140 mm y 375 mm de altura. El equipo utilizado para el ensayo fue la máquina universal MTS 810-Test, la misma que fue utilizada para el ensayo a compresión y flexión en tres puntos. El ensayo se realizó mediante la aplicación constante de la carga bajo el control de desplazamientos a una velocidad de 0.25 mm/min. Se pusieron dos dispositivos LVDT verticales para medir la respuesta del espécimen. Los LVDT verticales fueron colocados en el tercio central de la altura de la cara de aplicación (ver Figura 3.5). LVDT horizontales no fueron colocados debido a que el espacio disponible para la instalación de los dispositivos fue insuficiente. La ecuación (3.4) se utilizó para determinar el valor de la resistencia a la compresión (f'_m) donde P es la carga máxima registrada en Newtons y A es el área neta de la superficie de contacto en mm².

$$f'_m = \frac{P}{A} \quad (3.4)$$

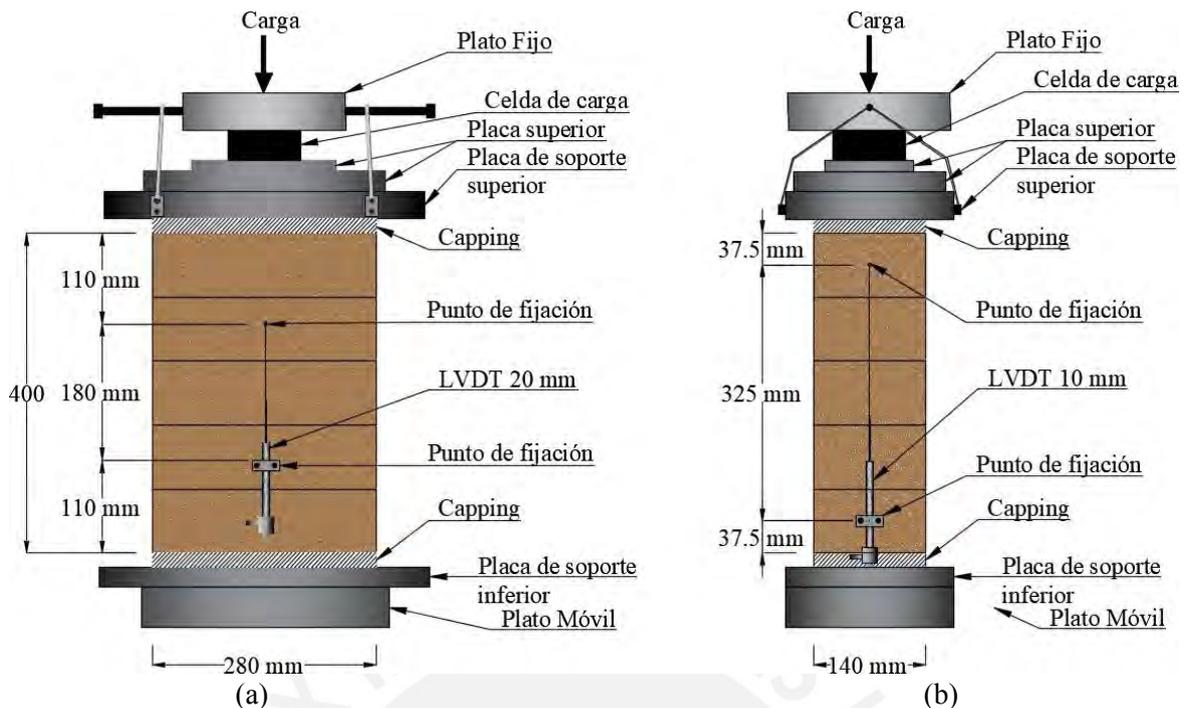


Figura 3.5: Configuración del ensayo de compresión de prismas (a) Vista frontal (b) Vista lateral izquierda

3.2.4. Parámetros obtenidos a partir de los ensayos mecánicos

a) Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad (E) se calculó mediante los lineamientos de la norma E111-17 (2017). El método utilizado fue el método gráfico con las curvas de esfuerzo – deformación obtenidas del ensayo de compresión de unidades de BTC, del ensayo de flexión en tres puntos y del ensayo de compresión uniaxial de prismas. El método propuesto en la norma está limitado a materiales en los cuales la fluencia es insignificante en comparación con la deformación producida después de la carga y al estado elástico. Los problemas asociados con establecer el origen de la curva de esfuerzo - deformación, la determinación del inicio del módulo tangente y del módulo secante están fuera del alcance del método establecido en la norma. El módulo de elasticidad, según la norma, es determinado como la relación entre el esfuerzo y su deformación correspondiente debajo del límite proporcional. El límite proporcional está ubicado debajo del máximo esfuerzo que un material es capaz de soportar, donde la deformación es proporcional a la carga aplicada (ley de elasticidad de Hooke). El módulo de elasticidad se calcula como se indica en la ecuación (3.5). La medición para determinar el módulo de elasticidad se tomó desde un esfuerzo pequeño denominado precarga (R). El valor de R se tomó desde el 15% de la carga máxima registrada, cuya deformación es lo suficientemente grande como para minimizar los

errores de la data. El valor del límite proporcional se tomó a 45% de la carga máxima registrada (ver Figura 3.6).

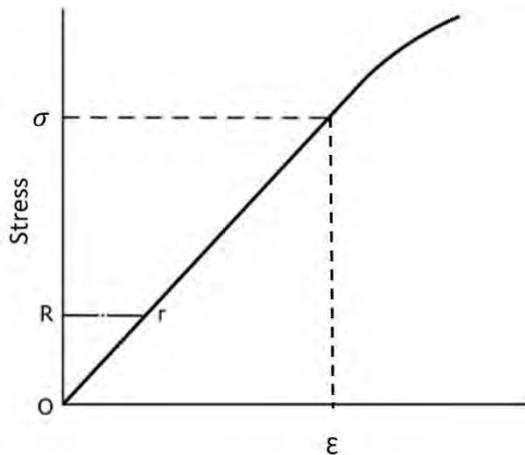


Figura 3.6: Módulo de elasticidad que se calcula entre el esfuerzo ubicado debajo del límite proporcional y R (precarga)

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (3.5)$$

Donde;

$$\sigma = \frac{\Delta P}{A_o}; \epsilon = \frac{\Delta c}{L_o}$$

Donde;

ΔP = Incremento de la carga (N)

A_o = Area neta del espécimen (mm^2)

Δc = Variación de la elongación

L_o = Longitud del dispositivo

b) Coeficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson (ν) proporcionó una medida del estrechamiento de la sección de los prismas de BTC interconectados ensayados a compresión uniaxial. En materiales isotrópicos el coeficiente de Poisson se calcula mediante la relación entre la deformación vertical y la deformación horizontal $\left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_h}\right)$ medidos por los LVDTs. Sin embargo, en la

presente investigación la deformación horizontal no fue determinado en el ensayo, debido a que la longitud disponible del espécimen fue insuficiente en comparación de la longitud requerida para la instalación del LVDT. Por esta razón, se utilizó el criterio de Bosiljkov, et al. (2005), quienes recomendaron que el valor del coeficiente de Poisson oscila entre el 30% de f_m .

c) Módulo de corte

El módulo de corte (G) fue calculado mediante la ecuación (3.6) para los prismas de BTC interconectados donde, E es el módulo de Elasticidad de los prismas y ν es el coeficiente de Poisson. La variación de los resultados es mostrada en términos del coeficiente de variación (CV).

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (3.6)$$

CAPITULO 4. PROCESO DE PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE BTC

Resumen

En el presente capítulo se abordan todos los aspectos de la producción del BTC y su caracterización mecánica. Se aborda primeramente la caracterización física del suelo y el tratamiento utilizado para mejorar sus propiedades físicas con la finalidad de que sea idóneo para la fabricación de BTC. Se describe el proceso de fabricación de un BTC convencional haciendo uso de una mezcladora de eje vertical, la máquina Eco Brava y mano de obra. Finalmente, se muestran los resultados de la caracterización mecánica del BTC en términos de esfuerzo de compresión y flexión.

4.1. Análisis del suelo base

4.1.1. Caracterización física del suelo base

El suelo base en estado natural es denominado S-1 y proviene del distrito de Ventanilla ubicado en la provincia del Callao, Lima. El suelo S-1 no poseía materia orgánica pero sí una gran cantidad de terrones como se observa en la Figura 4.1. Para realizar la caracterización física se realizó un muestreo por el método del cuarteo resultando así muestras significativas tal como se muestran en la Figura 4.2. Los resultados de la caracterización física del suelo S-1 se observa en la Tabla 4.1 y la curva granulométrica en la Figura 4.3. Además, se realizó el análisis químico del suelo base mediante la fluorescencia de rayos X (XRF), donde los resultados obtenidos de observan en la Tabla 4.2. Tabla 4.2. Composición química del suelo S-1 obtenida del ensayo XRF



Figura 4.1: Suelo base (S-1) proveniente del distrito de Ventanilla



Figura 4.2: Muestreo del suelo base S-1

Tabla 4.1. Resultados de la caracterización física del suelo S-1

Ensayos	Norma	Resultado
Contenido de humedad	ASTM D2216 (2010)	12.6 %
Límite líquido	ASTM D4318 (2017)	28.2 %
Límite plástico	ASTM D4318 (2017)	19.3 %
Índice de plasticidad	ASTM D4318 (2017)	9.0 %
Gravedad específica	ASTM D854 (2014)	2.49

Tabla 4.2. Composición química del suelo S-1 obtenida del ensayo XRF

Elemento	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Otros
(%)	17.94	60.25	4.21	8.05	2.08	3.05	2.59	<1

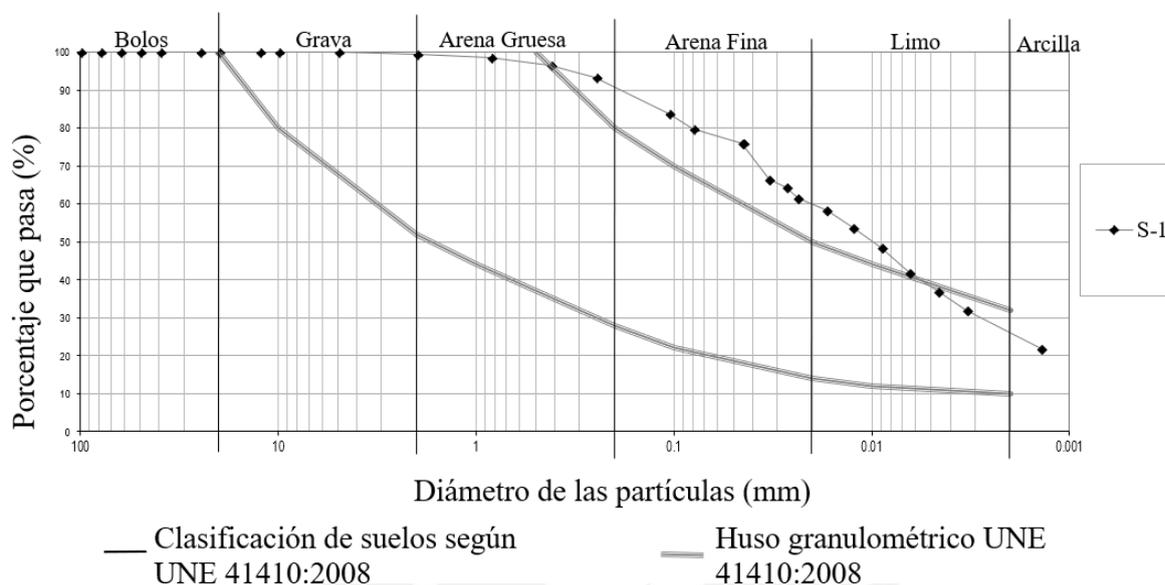


Figura 4.3: Curva granulométrica del suelo base S-1

4.1.2. Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo base

El objetivo de mejorar las propiedades físicas del suelo base (S-1) es que el suelo sea idóneo para la fabricación de BTC. El suelo idóneo es aquel que cumple con la granulometría, plasticidad, peso específico y densidad de compactación requeridos por la norma UNE 41410 (2008) y las recomendaciones de Sturm (2014). Houben & Guillaud (1994) estudiaron sobre la granulometría de suelos adecuados para la fabricación de BTC. Los resultados obtenidos del estudio los usaron para elaborar un huso granulométrico que fue adoptado por la norma UNE 41410 (2008). Otro parámetro importante es la plasticidad del suelo, la norma UNE 41410 (2008) descalifica el uso de suelos con contenido de arcilla menor al 10%. El mejoramiento del suelo S-1 se realizó mediante la adición de arena gruesa (Ag-1) en porcentajes de 40% y 70%, por lo cual se obtuvo dos mezclas de suelo mejoradas S-2 y S-3 respectivamente. El análisis granulométrico de la arena (Ag-1) y de suelos mejorados S-2 y S-3 se observan en las curvas granulométricas se muestran en la Figura 4.4. Los resultados de los límites de consistencia de cada suelo se observan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3. Límites de consistencia de los suelos Ag-1, S-2 y S-3

Límite de consistencia	Ag-1	S-2	S-3
Límite Plástico	No presenta	13.6%	Muy bajo
Límite Líquido	No presenta	21.2%	Muy bajo
Índice de Plasticidad	No presenta	7.6%	Muy bajo

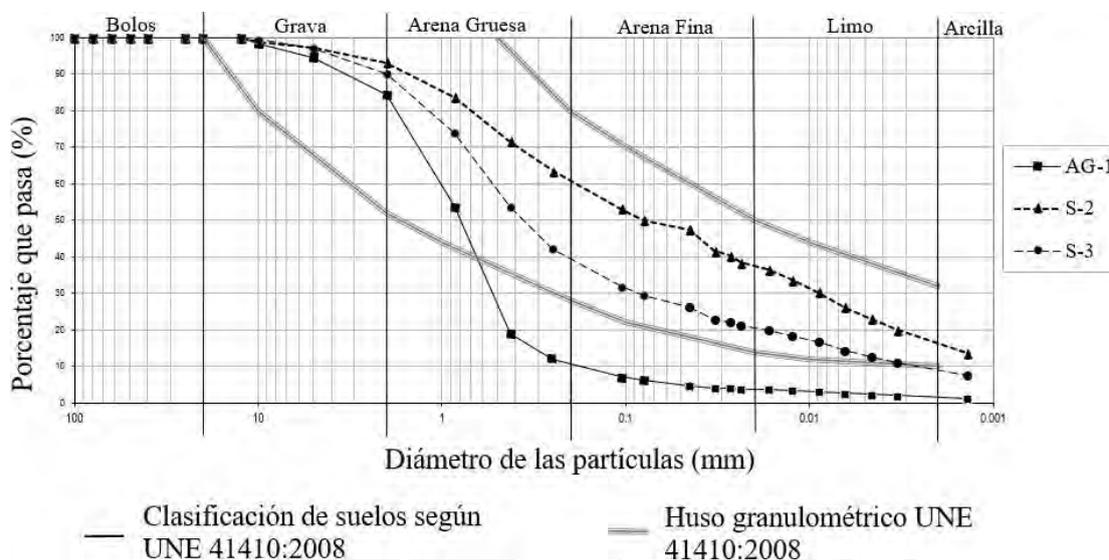


Figura 4.4: Curva granulométrica del suelo Ag-1, S-2, S-3

Los suelos mejorados S-2 y S-3 se encuentran dentro del huso granulométrico propuesto por la norma UNE 41410 (2008). Sin embargo, el suelo S-3 no presenta plasticidad debido a que contiene 7.5% de arcilla en su composición, por tal razón el uso de este suelo es descalificado. El suelo S-2 contiene una cantidad de arcilla del 13.4% y sus límites de consistencia están dentro del rango de valores requeridos por la norma UNE 4110 (2008) y las recomendaciones de Sturm (2014). De los resultados obtenidos, el suelo idóneo para fabricar BTC fue el suelo S-2 que tiene una relación de suelo-arena de 0.6: 0.4. La fabricación de BTC con un grado de compactación óptima está ligada al contenido óptimo de humedad del suelo S-2, para lo cual se realizó el ensayo de proctor estándar. La curva de compactación del suelo S-2 mostrada en la Figura 4.5 indica una densidad seca de compactación máxima de 1872 kg/m³ para un contenido óptimo de humedad del 13.9%. Así mismo, se realizó el análisis químico del suelo S-2 mediante la fluorescencia de rayos X (XRF) (ver Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Composición química del suelo S-2 obtenida del ensayo XRF

Elemento	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	Otros
(%)	16.39	61.88	4.62	7.54	2.46	2.4	3.24	<1

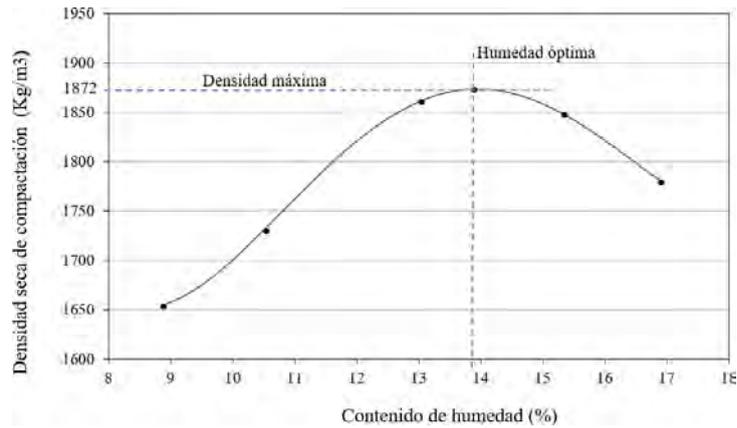


Figura 4.5: Curva de compactación del suelo S-2

4.2. Producción de BTC

4.2.1. Geometría del BTC

La geometría del bloque y el sistema de interconexión se adaptaron en base al proyecto HiloTec (Sturm, 2014). El BTC tiene una base rectangular de 140x280 mm y una altura de 75 mm. Además, presenta dos agujeros que traspasan el cuerpo del bloque de forma transversal cada uno de 50 mm de diámetro. La unidad presenta un sistema de interconexión hembra – macho de 10 mm de espesor que permite el enlace vertical de los bloques en la mampostería. En la Figura 4.6 se observa del detalle de la geometría del BTC desde distintas perspectivas.

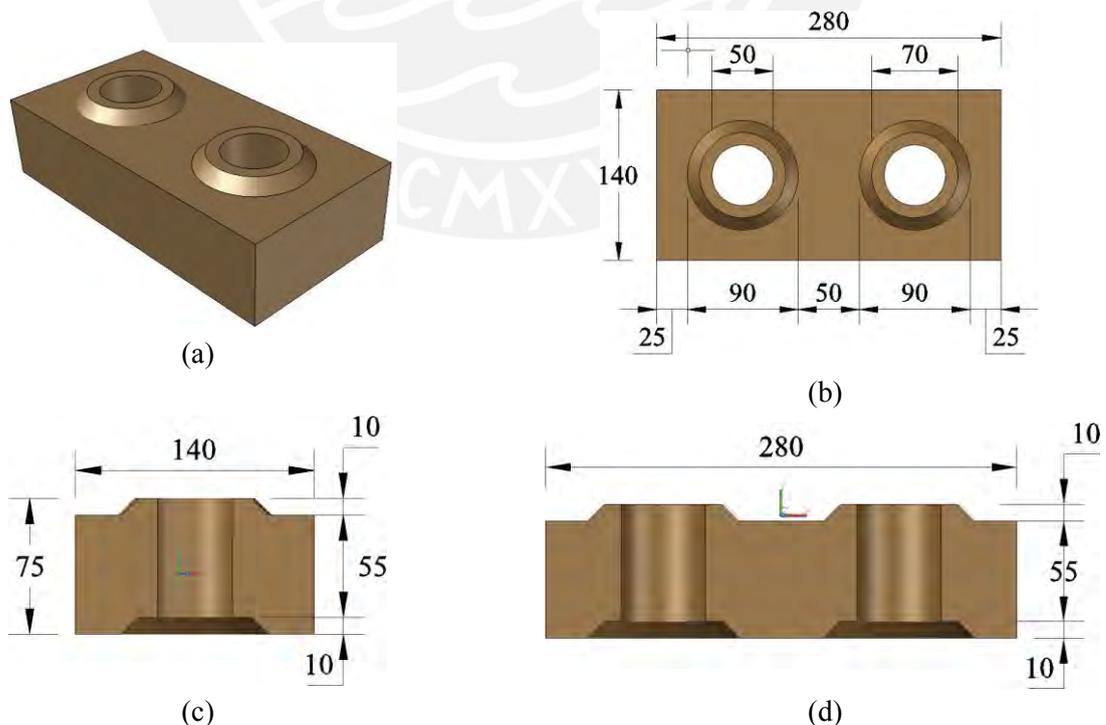


Figura 4.6: Geometría del BTC (unidades en mm) (a) vista isométrica (b) vista en planta (c) corte transversal (d) corte longitudinal

4.2.2. Proceso de producción de BTC

El proceso de producción de BTC se llevó a cabo en base al suelo S-2, con el uso de una mezcladora de eje vertical y la máquina Eco Brava descrita en la sección 2.2.3 (ver Figura 4.7). El proceso de producción empieza con el tamizado del suelo base y la arena a través de una malla de 5 mm de espesor. El siguiente paso consiste en introducir el agua gradualmente luego de que los insumos secos se hayan mezclado durante 30 s para luego introducir la mezcla dentro de la tolva de la Eco Brava (ver Figura 4.8). El proceso de producción de BTC acaba cuando el número requerido de especímenes para los ensayos es cubierto. Los especímenes recién fabricados se cubren con un plástico durante siete días y posteriormente se dejan al aire libre dentro de un almacén cerrado (ver Figura 4.9).

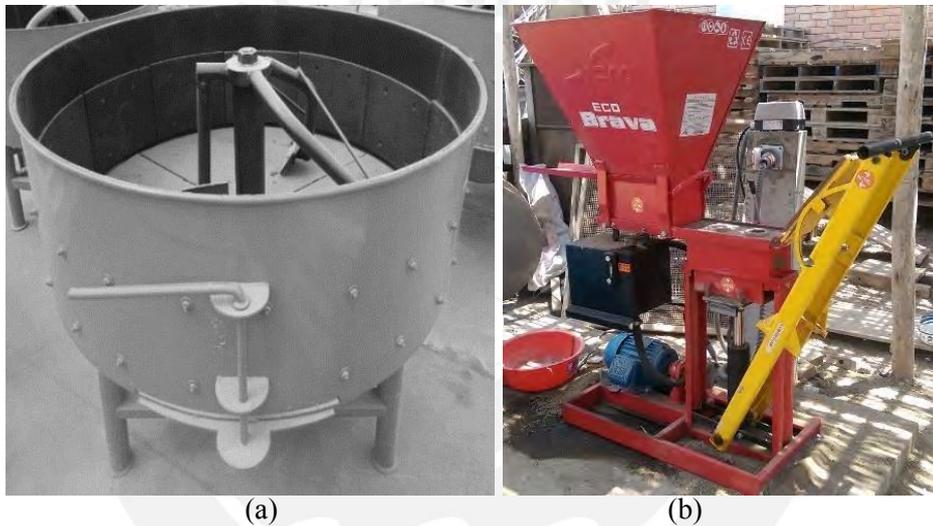


Figura 4.7: Equipos utilizados para la producción de BTC (a) mezcladora de eje vertical
(b) máquina Eco Brava



Figura 4.8: Proceso de producción de BTC (a) Tamizado del suelo con malla de 5mm de abertura (b) mezclado del suelo, la arena y agua (c) colocación del material dentro de la caja de la máquina (d) compresión del suelo con el sistema hidráulico de la máquina Eco Brava (e) producto final

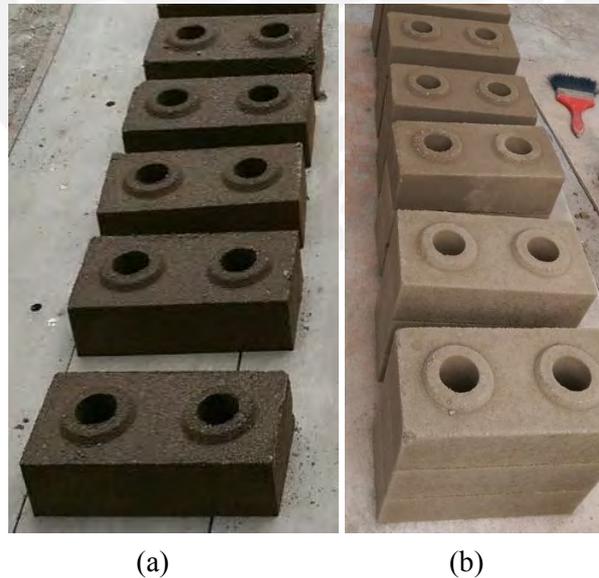


Figura 4.9: BTC fabricados con la máquina Eco Brava (a) BTC recién fabricados (b) BTC secos a los 28 días

4.3. Caracterización mecánica de BTC

La caracterización mecánica de BTC se realizó mediante ensayos de compresión y flexión en tres puntos. La cantidad de muestras se detallan en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Detalle de muestras de BTC ensayados

Muestra	Denominación	Edad	Ensayo	Cantidad
BTC	C-007	7 días	Compresión	5
	C-014	14 días	Compresión	3
	C-028	28 días	Compresión	2
	F-056	56 días	Flexión en tres puntos	2

4.3.1. Ensayo de compresión de BTC

La resistencia a la compresión se determinó mediante el ensayo de compresión uniaxial desarrollado a los 7, 14 y 28 días de edad para determinar también su evolución en el tiempo. Los resultados del ensayo de compresión se muestran en la Figura 4.10 donde se puede observar la curva de evolución de resistencia.

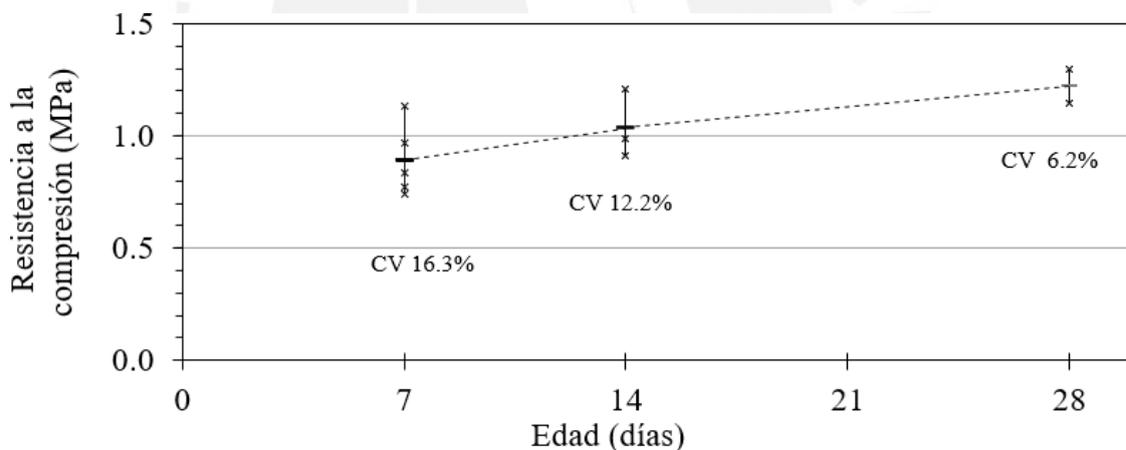


Figura 4.10: Evolución de la resistencia a la compresión de BTC a los 7, 14 y 28 días

La resistencia a la compresión del BTC a los siete días fue de 0.9 MPa (CV 16.3%), 1.0 MPa (CV 12.2%) a los catorce días y a los veintiocho días resultó 1.3 MPa (CV 6.2%). En la Figura 4.11 se observa la curva de esfuerzo-deformación del BTC a los 28 días de edad. El módulo de elasticidad que se obtuvo de la curva de esfuerzo deformación fue de 88.20 MPa (CV 2%).

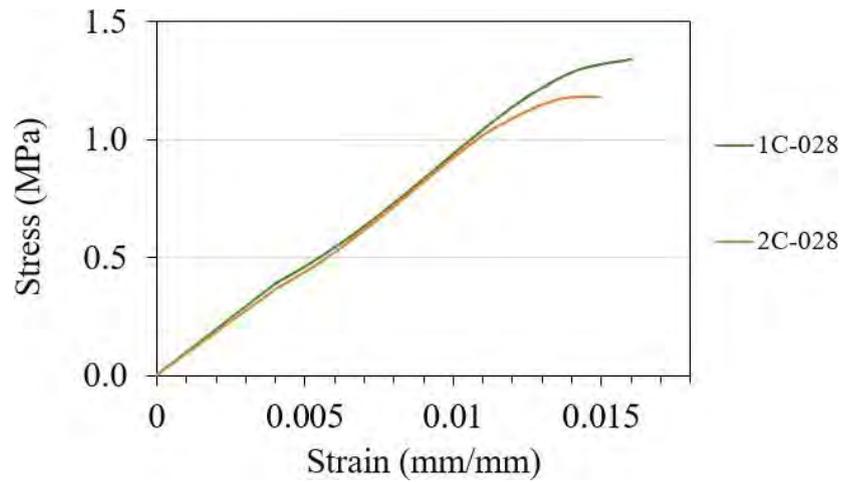


Figura 4.11: Curva de esfuerzo-deformación de BTC a los 28 días de edad

4.3.2. Ensayo de flexión en tres puntos de BTC

La resistencia a la flexión de BTC se determinó mediante el ensayo de flexión en tres puntos (ver Figura 4.12). Mediante el ensayo se determinó un esfuerzo a la flexión a los 56 días de edad de 0.12 MPa con CV<1%. Además, la Figura 4.13 muestra la curva de fuerza-deflexión del ensayo.

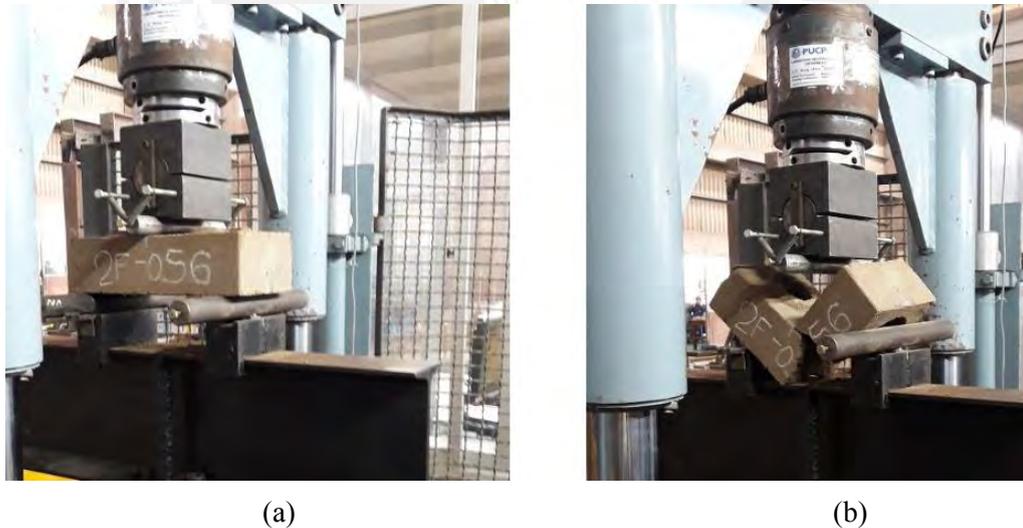


Figura 4.12: Ensayo de flexo-tracción sobre BTC de edad de 56 días (a) Montaje del ensayo en el LEDI (b) Falla de la muestra

Tabla 4.6. Esfuerzo a la flexión de BTC a los 56 días de edad

Muestra	f_r promedio (MPa)	S (MPa)	CV
BTCE con 8% de cemento	0.12	<0.1	<1%

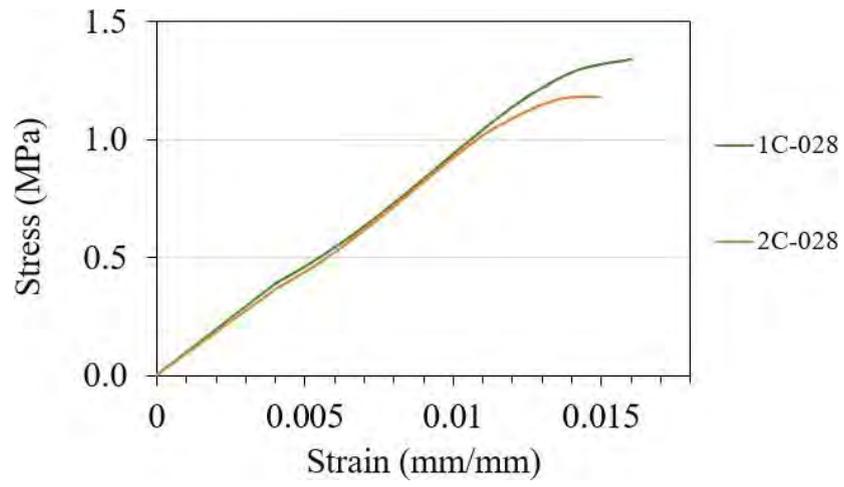


Figura 4.13: Curva de fuerza-deflexión de BTC a los 56 días de edad



CAPITULO 5. PROCESO DE PRODUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE BTCs ESTABILIZADA

Resumen

En el presente capítulo se desarrolla el proceso de producción de BTCE químicamente con cemento y geopolímero de puzolana. Cada acápite inicia con la descripción de materiales. A continuación, se presenta el proceso de estabilización. Se inicia con el proceso de estabilización química con cemento, que ayudó a determinar un porcentaje idóneo para su posterior caracterización mecánica. El capítulo finaliza con el desarrollo del proceso de estabilización de BTC estabilizada con geopolímero de puzolana, donde también se determinó un porcentaje idóneo de geopolímero de puzolana para su caracterización mecánica.

5.1. Producción y caracterización mecánica de BTCs estabilizada con cemento

5.1.1. Descripción de los materiales

a) Suelo mejorado S-2

El suelo utilizado como base para la producción de BTCE con cemento es el suelo mejorado S-2 que contiene una proporción de suelo natural (S-1) y arena (Ag-1) de 0.6:0.4. Las propiedades físicas del suelo S-2 se presentan en el Capítulo 4.

b) Cemento

El cemento utilizado en la etapa de estabilización química de suelos para la fabricación de BTCE es de marca SOL tipo I y cumple con la norma técnica de peruana NTP.334 y ASTM C-150. El cemento SOL tipo I es elaborado a base de clinker y yeso y viene envasado en bolsas antihumedad en una presentación de 42.5 kg.

c) Agua

El agua utilizada es fundamental para la hidratación del cemento y para que la mezcla desarrolle su capacidad ligante. El tipo de agua utilizada es potable y la cantidad utilizada dependió de la trabajabilidad de la mezcla entre el 8% y 9% en peso.

5.1.2. Proceso de estabilización química y producción

Todos los suelos pueden ser utilizados para producir una mezcla de suelo-cemento con la excepción de que cuando se requiere que esta sea una mezcla con calidad y consumo mínimo de cemento, el número de suelos aptos se reduce (Toirac, 2008). La elección de un suelo idóneo parte de su caracterización física, para lo cual se realizaron una serie de ensayos detallados en la sección 4.1. Los resultados obtenidos de la caracterización de cuatro tipos de suelo permiten la elección del más idóneo según las recomendaciones de Toirac (2008), UNE 41410 (2008) y Sturm (2014). Los suelos Ag-1, S-1 y S-3 están fuera del huso granulométrico establecido por la norma UNE 41410 (2008) y no tienen la plasticidad requerida para producir BTC, sin embargo, el suelo S-2 cumple satisfactoriamente con dichos criterios.

Un típico BTC contiene menos del 10% de cemento Portland en peso (Walker, 1999), por lo cual, la presente investigación maneja tres porcentajes de cemento de prueba. El suelo mejorado S-2 fue sometido a un proceso de estabilización con 5%, 8% y 10% de cemento

en peso. El proceso de estabilización empieza con la mezcla de todos los componentes secos dentro de una mezcladora de eje vertical y una vez obtenida una mezcla homogénea se añade el agua de manera lenta y gradual hasta llegar a una trabajabilidad adecuada y una pasta uniforme. La mezcla se considera idónea luego de que al realizar la prueba del bolillo (ver Capítulo 2) con la pasta obtenida, el bolillo no se destruye al ser partida por la mitad. Del procedimiento se obtienen tres tipos de mezclas de acuerdo a la cantidad de cemento incorporado: C-05, C-10, C-15; que corresponden a las cantidades de 5%, 8% y 10% de cemento incorporado respectivamente (ver Figura 5.1).

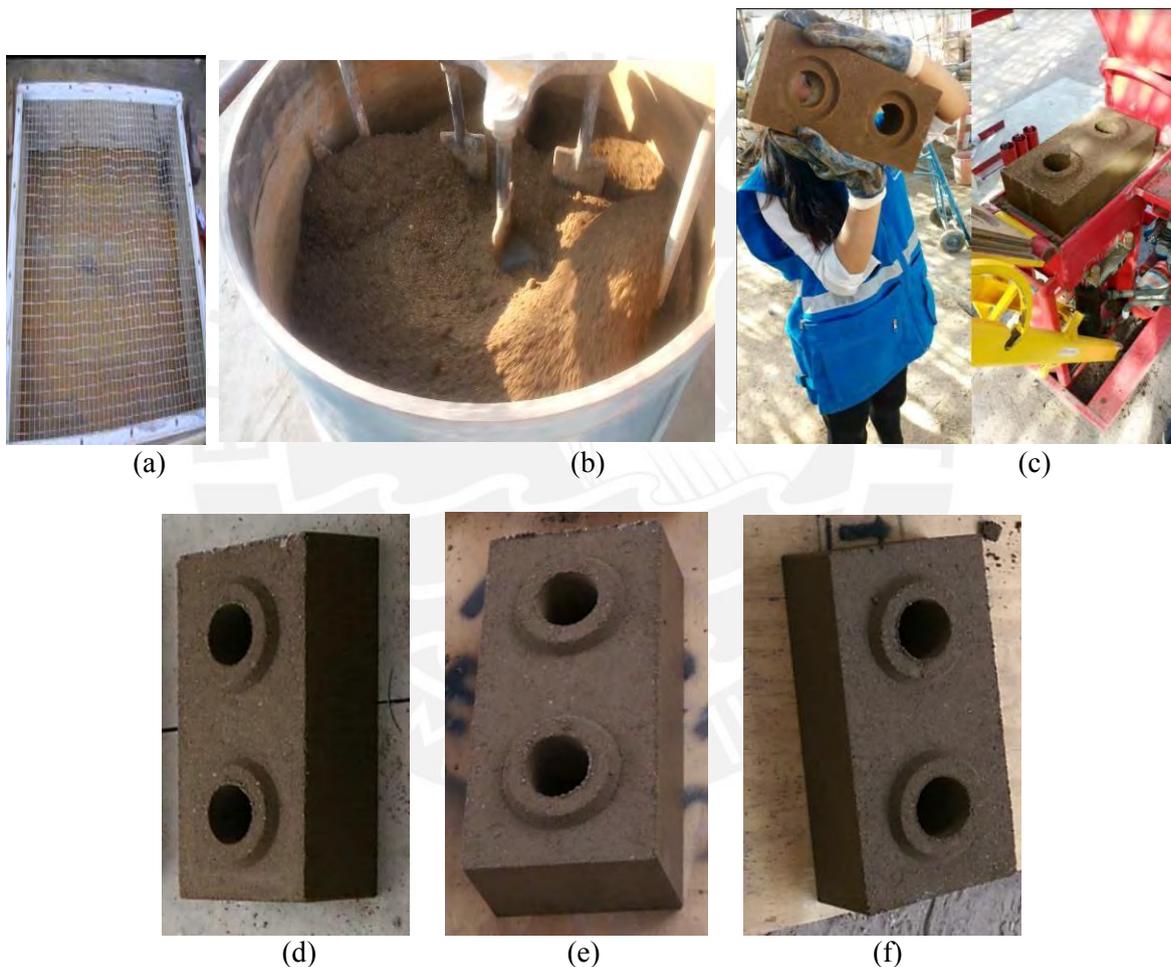


Figura 5.1: Producción de BTC (a) tamiz con abertura de 5 mm (b) mezclado de los materiales secos en la mezcladora de eje vertical (c) producción de BTC en la máquina Eco Brava (d) BTCE con 5% de cemento (e) BTCE con 8% de cemento (f) BTCE con 10% de cemento.

Finalmente, se observó que los BTCE con 5% de cemento eran débiles a la manipulación, mientras que los BTCE con 8% y 10% de cemento mostraban mayor resistencia y calidad de acabado. En la Tabla 5.1 se observan los resultados de la resistencia a la compresión de BTCE con 0%, 5%, 8% y 10% de cemento a los 7 días. La norma UNE 41410 (2008),

clasifica a los BTC según una resistencia a la compresión mínima en tres clases: BTC1, BTC2 y BTC3 cuya resistencia mínima requerida es de 1.3 MPa, 3 MPa y 5 MPa respectivamente. Las muestras para la caracterización mecánica de BTCE con cemento se realizó con suelo estabilizado con 8% de cemento. El criterio de selección del porcentaje de cemento se realizó en términos de la calidad física del bloque, del costo, y la resistencia a la compresión.

Tabla 5.1. Comparación de la resistencia a la compresión respecto a la cantidad de cemento incorporado a los 7 días de edad en la etapa de estabilización química con cemento

Resistencia a la compresión (f ^b)	Cantidad de cemento en peso			
	0%	5%	8%	12%
Promedio (MPa)	0.9	1.9	2.4	3.7
S (MPa)	0.2	0.2	0.1	0.1
CV (%)	16.3	10.8	5.5	3.5

5.1.3. Caracterización mecánica a compresión y flexión

La caracterización mecánica de BTC estabilizada estuvo sujeta a la cantidad incorporada de agente estabilizante, lo cual fue evaluado según los resultados de resistencia a la compresión obtenida a los 7 días de edad con distintos porcentajes de cemento incorporado en la sección 5.1.2. La resistencia a la compresión del BTC estabilizada con 5%, 8% y 12% de cemento a los 7 días superó la exigencia de la norma UNE 41410 (2014), la cual es de 1.3 MPa. El BTC estabilizada con 5% mostró un aspecto físico muy frágil al tacto y poroso. El BTC con 12% de cemento presentaba un aspecto uniforme y resistente al tacto sin embargo resultó más costoso. Por estas razones, la caracterización mecánica se llevó a cabo con BTC estabilizada con 8% de cemento mediante ensayos de compresión y flexión en tres puntos. La cantidad de muestras de ensayo se detallan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Detalle de muestras de BTC estabilizada con 8% de cemento ensayados

Muestra	Denominación	Edad	Ensayo	Cantidad
BTC estabilizada con 8% de cemento	CC-0807	7 días	Compresión	5
	CC-0814	14 días	Compresión	3
	CC-0828	28 días	Compresión	4
	FC-0856	56 días	Flexión en tres puntos	5
BTC estabilizada con 8% de cemento saturado	CCS-0856	56 días	Compresión	6

a) Resistencia a la compresión del BTCE con 8% cemento

La Figura 5.2(a) muestra los especímenes fabricados con 8% de cemento y la Figura 5.2(b) un espécimen para el ensayo de compresión. La Figura 5.3 muestra el montaje del ensayo de compresión y la falla del espécimen. La resistencia a la compresión se determinó en las edades de 7, 14 y 28 días de edad para determinar también su evolución en el tiempo. La curva de la evolución de resistencia a la compresión resistencia a la compresión se muestran en la Figura 5.4. La dispersión de resultados se mide a través del CV. La resistencia a la compresión del BTCE con 8% de cemento a los 7, 14 y 28 días resultó 2.3 MPa (CV 11.9%), 3.5 MPa (CV9.6%) y 3.6 MPa (CV 17.9%) respectivamente. Según la norma UNE 41410 (2008), este tipo de BTC están dentro de la clase 2 de acuerdo a su resistencia a la compresión. El módulo de elasticidad que se obtuvo de la curva de esfuerzo deformación a los veintiocho días de edad (ver Figura 5.5) que resultó 249.9 MPa (CV 3%).



Figura 5.2: Producción de BTCE con 8% de cemento (a) Total de muestras fabricadas (b) muestra para ensayo de compresión

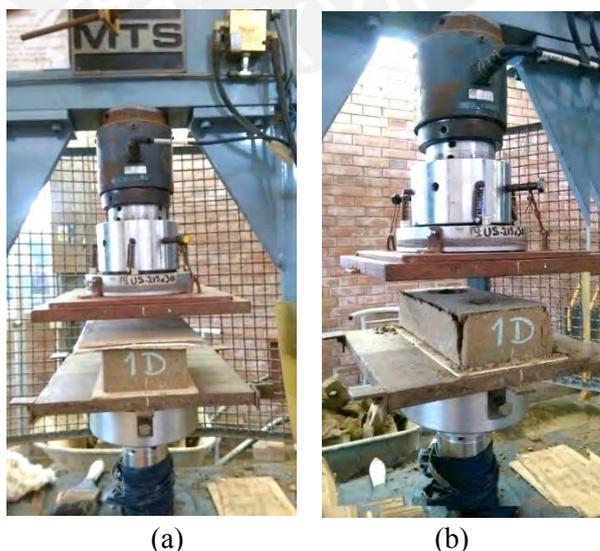


Figura 5.3: Ensayo de compresión de BTC (a) montaje del ensayo en el LEDI (b) falla de la muestra

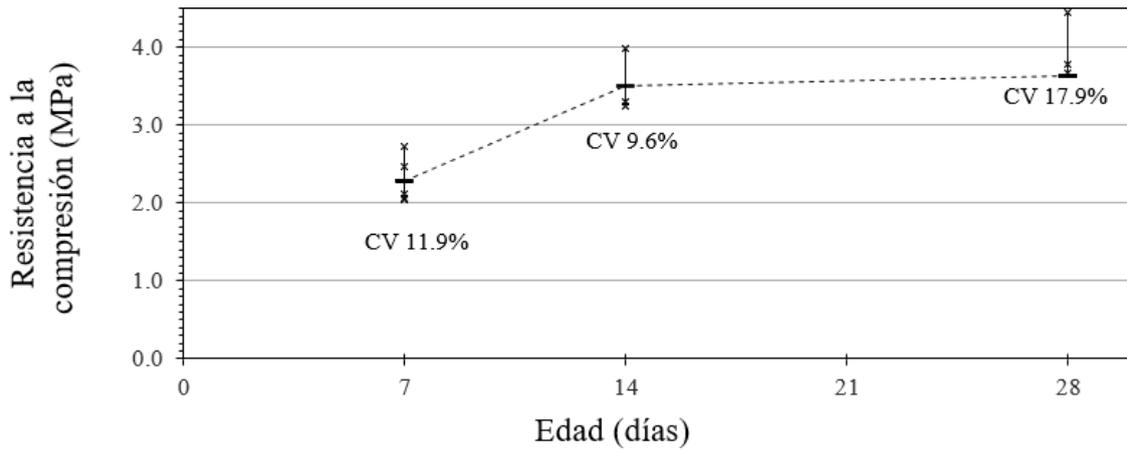


Figura 5.4: Evolución de la resistencia a la compresión de BTCE con 8% de cemento a los 7, 14 y 28 días

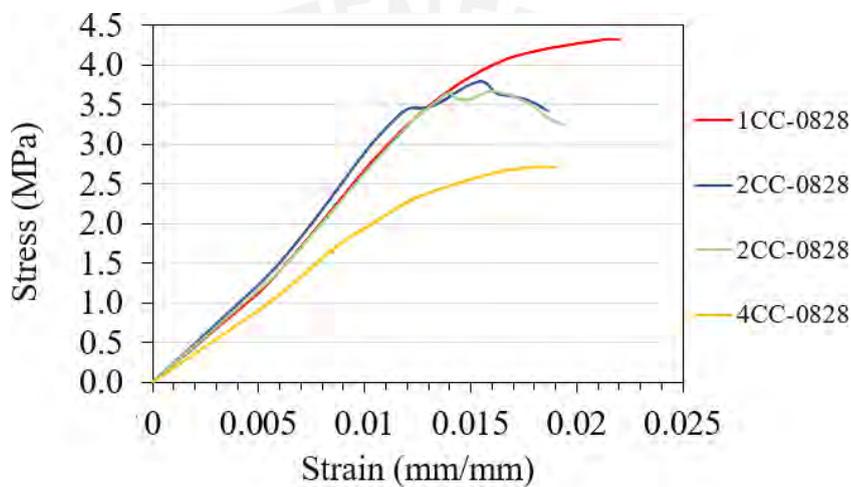


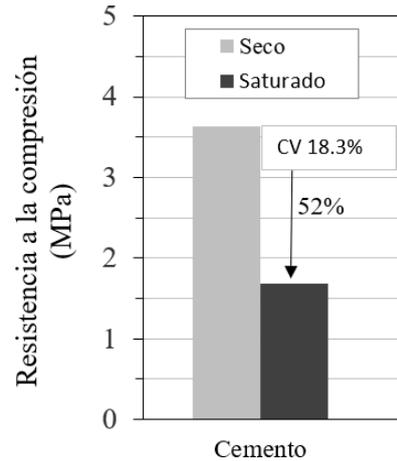
Figura 5.5: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 8% de cemento a los 28 días de edad

b) Resistencia a la compresión del BTCE con cemento en estado saturado

El ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM 1633 (2014), y de acuerdo a lo establecido en el acápite 3.2.1. Las muestras de ensayo, que tienen 56 días de edad se sumergieron 24 horas antes de ser ensayadas en agua potable. Además, se ha determinado el porcentaje de absorción del espécimen, para lo cual, se registraron el peso seco y el peso húmedo luego del tiempo de sumergido. El porcentaje de absorción del BTCE con 8% de cemento resultó de 9.1%. La variación de la resistencia a la compresión de los BTCE con 8% de cemento a los 56 días de edad en estado saturado resultó de 1.7 MPa (CV 18.3%) menor en 52% respecto a los especímenes secos. El porcentaje de pérdida de resistencia se visualiza en la Figura 5.6 (b). El módulo de elasticidad se obtuvo de la curva de esfuerzo deformación a los 56 cincuenta y seis días de edad (ver Figura 5.7) resultó 170 MPa (CV 7%).



(a)



(b)

Figura 5.6: Estado saturado de BTC estabilizada con 8% de cemento a los 56 días de edad (a) Muestra saturada (b) Variación de la resistencia a la compresión

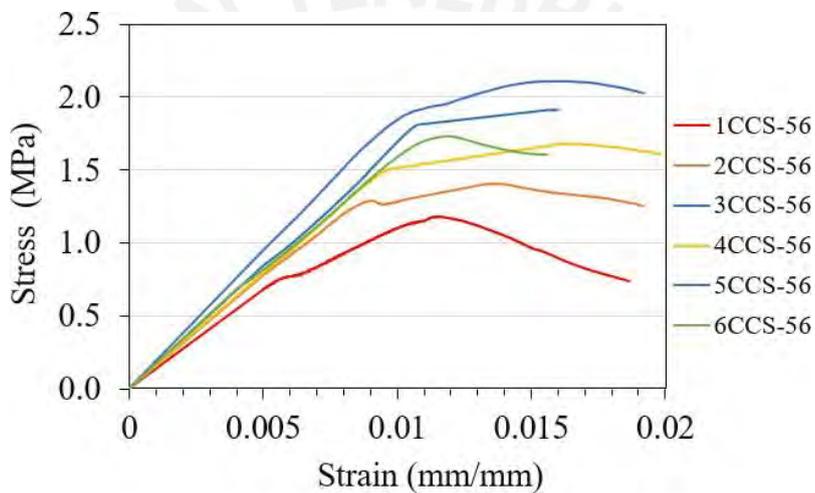


Figura 5.7: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 8% de cemento a los 56 días de edad en estado saturado

c) Resistencia a la flexión del BTCE con cemento

El ensayo de flexión en tres puntos se realizó en base a los lineamientos de la norma EN 772-6 (2001) y según lo establecido en el Capítulo 3. La resistencia a la flexión fue determinada en BTCE con 8% de cemento a la edad de 56 días. En la Figura 5.8 se observa tanto la configuración de ensayo como el modo de falla del espécimen. Mediante el ensayo se determinó un esfuerzo a la flexión a los 56 días de edad de 0.77 MPa (CV 24.8%) (ver Tabla 5.3). Además, la Figura 5.9 muestra la curva de fuerza-deflexión del ensayo.



Figura 5.8: Ensayo de flexión en tres puntos sobre BTCE con 8% de cemento a los 56 días
 (a) Montaje del ensayo en el LEDI (b) Falla de la muestra

Tabla 5.3. Esfuerzo a la flexión de BTCE con 8% de cemento a los 56 días de edad

Muestra	f_r promedio (MPa)	S (MPa)	CV
BTCE con 8% de cemento	0.66	0.16	24.8%

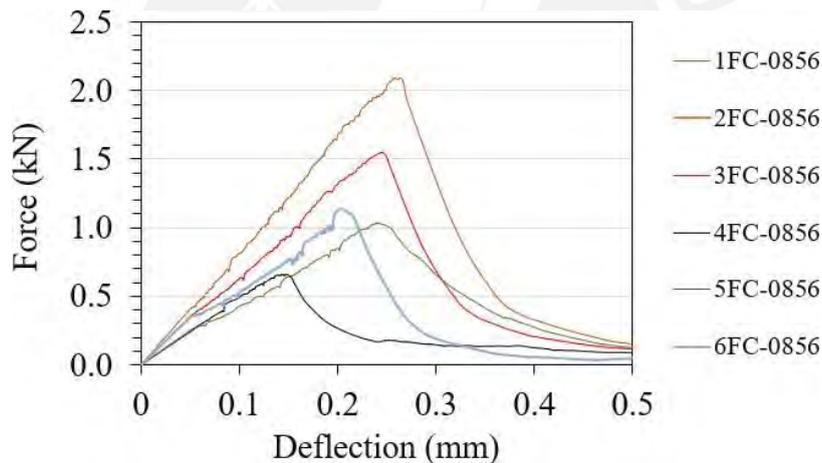


Figura 5.9: Curva de fuerza-deflexión de BTCE con 8% de cemento a los 56 días de edad

5.2. Producción y caracterización mecánica de BTCs estabilizada con puzolana activada alcalinamente

5.2.1. Descripción de los materiales

a) Suelo mejorado S-2

El suelo utilizado como base para la producción de BTCE con cemento es el suelo mejorado S-2 que contiene una proporción de suelo natural (S-1) y arena (Ag-1) de 0.6:0.4. Las propiedades físicas del suelo S-2 se presentan en el Capítulo 4.

b) Puzolana

La Figura 5.11 muestra a la puzolana que fue utilizada para mejorar las propiedades mecánicas del suelo en la etapa de estabilización química del suelo. La empresa Cia Minera Agregados Calcáreos S.A. (COMACSA) es la empresa proveedora del material en bolsas de 15 kg cada una. Así mismo, el tamaño de partícula varía desde 3.83 μm hasta 34.13 μm y cuenta con un análisis granulométrico que puede observarse en el Anexo 1. Además, el análisis químico del material mediante la fluorescencia de rayos X (XRF) muestra una presencia del 53.55% de óxido de silicio (SiO_2) y del 10% de óxido de aluminio (Al_2O_3) dichos resultados pueden observarse en el Anexo 1. Se puede decir que la concentración de aluminosilicatos en la puzolana es de 63.55%, en forma cristalina.

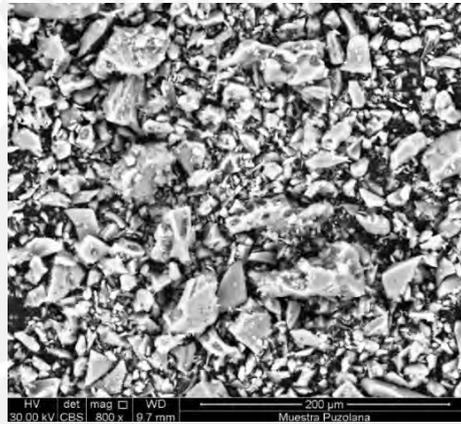


Figura 5.10: Forma de la partícula de la puzolana obtenida de la técnica del microscopio electrónico de barrido (MEB)

Tabla 5.4. Composición química de la puzolana obtenida del ensayo XRF

Elemento	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	CaO	Fe_2O_3	MgO	Cl	TiO_2	Otros
(%)	53.55	10.81	4.07	2.3	1.43	0.975	0.553	0.146	0.128	<0.1

c) Activador alcalino

El activador alcalino es utilizado para activar químicamente a la puzolana en el proceso de estabilización del suelo con puzolana. El activador alcalino es la mezcla de una solución de silicato de sodio combinado con una solución de hidróxido de sodio en una proporción de 1:2.5 respectivamente. En la Figura 5.12 se muestran el silicato de sodio en su presentación normal y el hidróxido de sodio en polvo y disuelta en agua destilada. El hidróxido de sodio es conocido también conocido como soda cáustica y se adquirió en forma de polvo con un grado de pureza del 99%, el cual fue disuelto en agua destilada para lograr una concentración de 10 molar. Los resultados del análisis químico del hidróxido de sodio se pueden visualizar

en el Anexo 3. El silicato de sodio es una solución viscosa inodora que se adquirió por embaces de 5 kg cada uno, el cual posee un contenido de óxido de sodio (Na_2O) del 8.45% y de óxido de silicio (SiO_2) del 28.10%. El detalle del análisis químico del silicato de sodio se presenta en el Anexo 4. En la Tabla 5.5 y Tabla 5.6 se muestra la composición química del hidróxido de sodio y del silicato de sodio.

Tabla 5.5. Composición química del hidróxido de sodio

Elemento	NaOH	NaCl	Fe_2O_3	Na_2CO_3
(%)	>99.0	<0.03	<0.005	<0.5

Tabla 5.6. Composición química del silicato de sodio

Elemento	Na_2O	SiO_2
(%)	8.45	28.1

5.2.2. Proceso de estabilización química y producción

Se evaluó el comportamiento de BTCE con 10% y 15% de geopolímero de puzolana con activador alcalino en una cantidad aproximada de 13% de peso. Se obtuvieron dos tipos de mezclas de suelo estabilizado según el porcentaje de puzolana incorporada: P-10, P-15. El procedimiento de estabilización química del suelo con puzolana y activador alcalino se realiza de acuerdo a las recomendaciones de Silva (Silva, et al., 2014), quién desarrollo el estudio de BTC con fly ash en lugar de puzolana con activador alcalino. El proceso de estabilización inicia con la mezcla del suelo S-2 con la puzolana dentro de una mezcladora de eje vertical durante 1 minuto. Luego de formar una mezcla homogénea, el activador alcalino es incorporado de forma lenta y gradual hasta formar una pasta homogénea. El procedimiento toma alrededor de 5 minutos y termina una vez que se obtuvo una pasta totalmente uniforme y trabajable. (Ver Figura 5.13)



Figura 5.11: Lote de puzolana en bolsas antihumedad de 15 kg

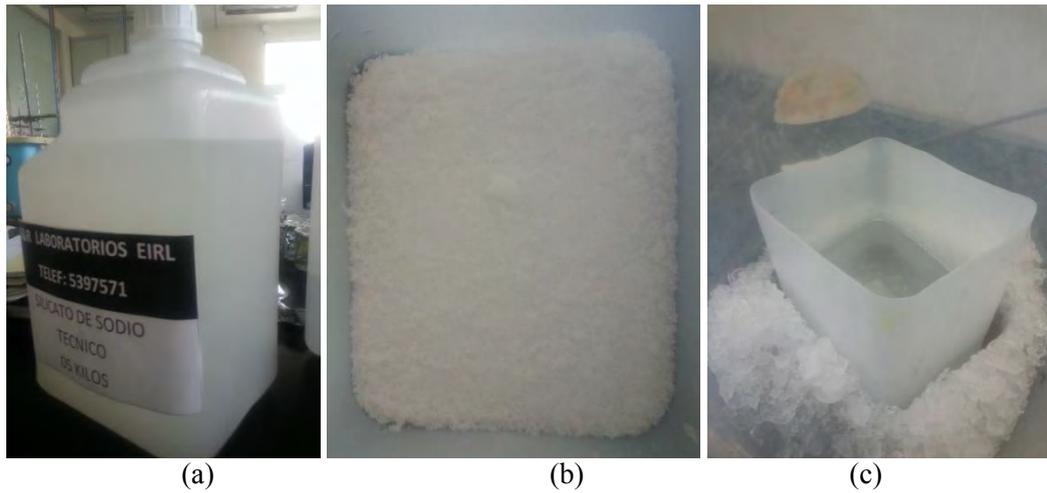


Figura 5.12: Componentes del activador alcalino (a) silicato de sodio (b) hidróxido de sodio (c) solución de hidróxido de sodio con agua destilada con concentración 10 molar

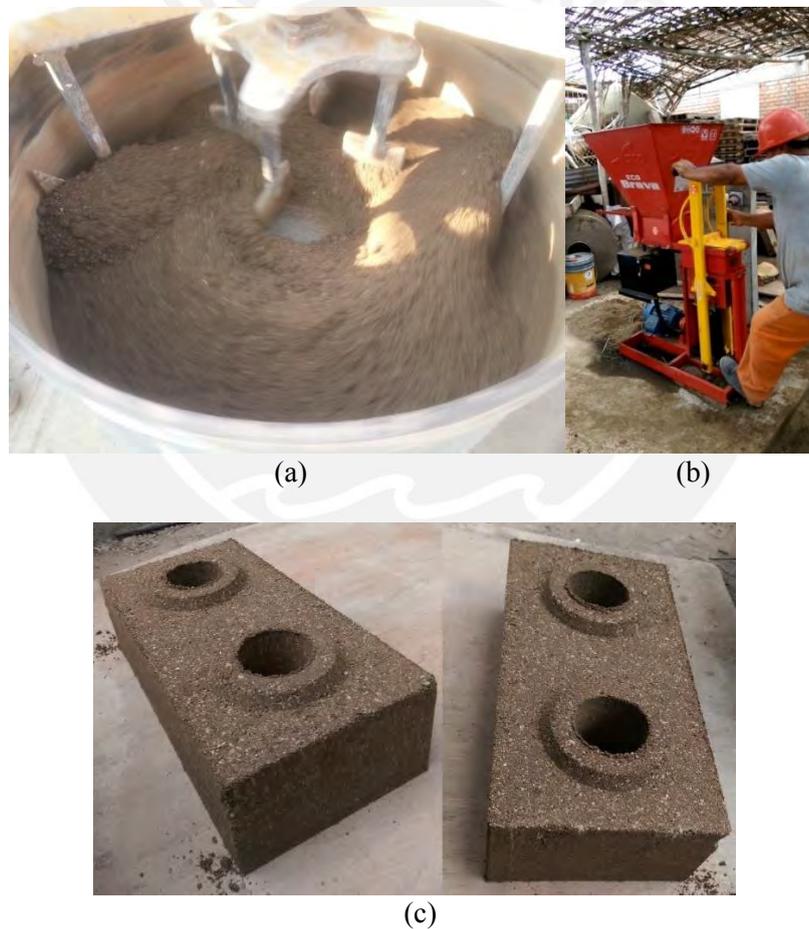


Figura 5.13: Proceso de producción de BTCE con geopolímero de puzolana (a) mezclado de los insumos secos (b) compresión hidráulica (c) BTCE con puzolana

Se observó que los BTCE con 10% y 15% de geopolímero de puzolana frescos eran resistentes a la manipulación y visualmente similares. La Tabla 5.7 muestra los resultados de la resistencia a la compresión de BTCE con 0%, 10% y 15% de geopolímero de puzolana

a los siete días con resultados iguales a 0.89 MPa, 1.02 MPa y 1.12 MPa respectivamente. Las muestras para la caracterización mecánica de BTCE con geopolímero de puzolana se realizó con suelo estabilizado con 15% de puzolana. El criterio de selección del porcentaje de puzolana se realizó en términos de la resistencia a la compresión normalizada por la norma de 1.3 MPa como mínimo.

Tabla 5.7. Comparación de la resistencia a la compresión respecto a la cantidad incorporada de puzolana activada alcalinamente a los 7 días de edad en la etapa de estabilización con geopolímero

Resistencia a la compresión (f ^b)	Porcentaje de cantidad de puzolana en peso		
	0%	10%	15%
Promedio (MPa)	0.9	1.0	1.1
S (MPa)	0.2	<0.1	<0.1
CV (%)	16.3	0.8	1.7

5.2.3. Caracterización mecánica a compresión y flexión

La cantidad de agente estabilizante se determinó en base a los resultados de resistencia a la compresión a los 7 días de BTC estabilizada con 10% y 15% de puzolana estudiados en la sección 5.2.2. Las características físicas de ambos especímenes eran similares, La resistencia mínima de 1.3 MPa y por tal motivo el BTC con 15% de puzolana activada alcalinamente fue seleccionada para la presente caracterización mecánica. La caracterización mecánica se llevó mediante ensayos de compresión y flexión en tres puntos. La cantidad de muestras se detallan en la Tabla 5.8.

Tabla 5.8. Detalle de muestras de BTC estabilizada con 15% de puzolana activada ensayados

Tipo de muestra	Denominación	Edad	Ensayo	Cantidad
BTC estabilizada con 15% de puzolana activada	CP-1507	7 días	Compresión	2
	CP-1514	14 días	Compresión	3
	CP-1528	28 días	Compresión	3
	FP-1556	56 días	Flexión en tres puntos	3
BTC estabilizada con 15% de puzolana activada saturado	CPS-1556	56 días	Compresión	3

a) Resistencia a la compresión del BTCE con 15% de geopolímero de puzolana

La resistencia a la compresión se realizó mediante el ensayo a compresión descrita en el acápite 4.3.3. La Figura 5.14 muestra el montaje del ensayo y la Figura 5.15 el modo de falla a compresión de los especímenes. La resistencia a la compresión se determinó en BTCE con

15% de puzolana en las edades de 7, 14 y 28 días de edad para determinar su evolución en el tiempo. La curva de la evolución de resistencia a la compresión se muestran en la Figura 5.16. La resistencia a la compresión del BTCE con 15% de cemento a los 7, 14 y 28 días tuvo resultados iguales a 1.12 MPa (CV 1.67%), 1.39 MPa (12.01%) y 2.38 MPa (CV <1%) respectivamente. Según la norma UNE 41410, 2008, este tipo de BTC está dentro de la clase 1 de acuerdo a su resistencia a la compresión. La dispersión de resultados se midió a través del CV. En la Figura 5.17 se observa la curva de esfuerzo-deformación del BTC a los 28 días de edad, de donde se calculó el módulo de elasticidad que resultó 208.5 MPa (CV 3%).



Figura 5.14: Ensayo de compresión de BTCE con geopolímero de puzolana



Figura 5.15: Modo de falla a compresión del BTCE con geopolímero de puzolana de espécimen

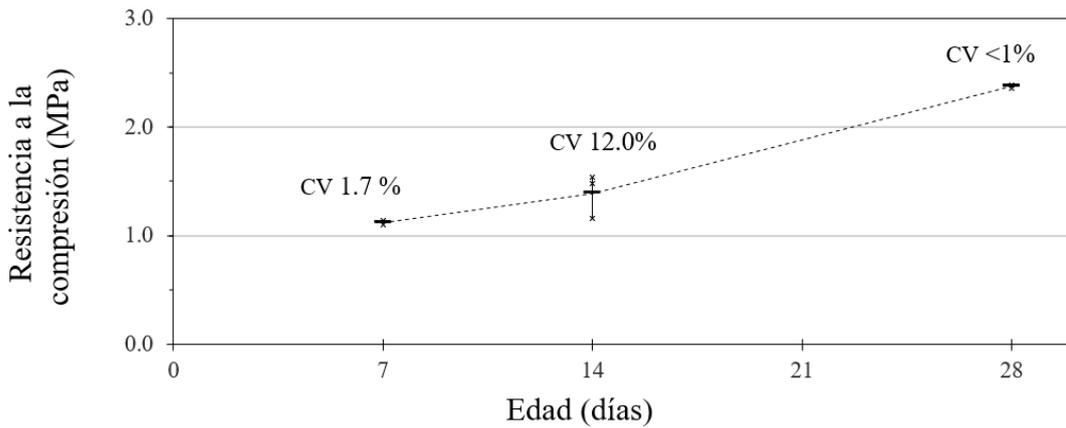


Figura 5.16: Evolución de la resistencia a la compresión de BTCE con 15% geopolímero de puzolana de puzolana a los 7, 14 y 28 días

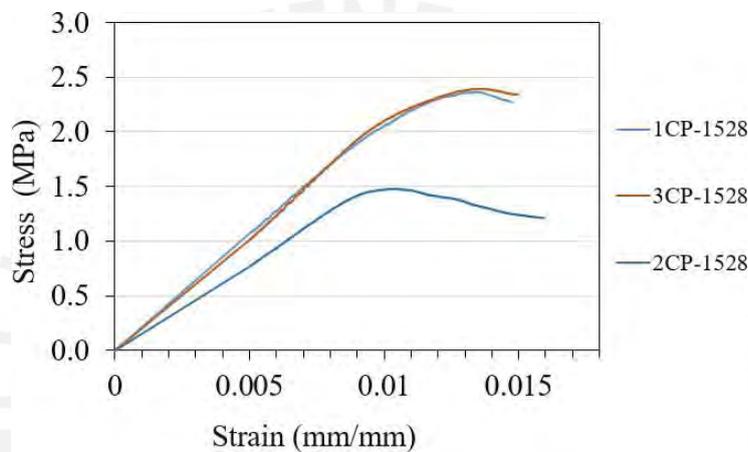


Figura 5.17: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 15% geopolímero de puzolana a los 28 días de edad

b) Resistencia a la compresión del BTCE con geopolímero de puzolana en estado saturado

El ensayo se realizó siguiendo los lineamientos de la norma ASTM 1633 (2014) y de acuerdo a lo establecido en la sección 3.2.1. Los BTCE con 15% de geopolímero de puzolana fueron ensayadas a los 56 días de edad, los cuales fueron sumergidas 24 horas antes en agua potable. Se ha determinado el porcentaje de absorción del espécimen, para lo cual, se registró su peso seco y su peso húmedo luego del tiempo de sumergido, obteniendo de esta forma un porcentaje de absorción del 10.3%. La Figura 5.18(a) muestra el espécimen en estado saturado. La resistencia a la compresión de los BTCE con 15% de geopolímero de puzolana a los 56 días de edad en estado saturado resultó de 0.70 MPa que es menor en 66% respecto a los especímenes secos (ver Figura 5.18(b)). El CV fue menor al 1%. La Figura 5.19 muestra la curva de esfuerzo – deformación del espécimen saturado. En la Figura 5.19 se observa la

curva de esfuerzo-deformación del BTC a los 28 días de edad, de donde se calculó el módulo de elasticidad que resultó 73.5 MPa (CV 5%).



Figura 5.18: Estado saturado de BTC estabilizada con 15% de puzolana activada alcalinamente a los 56 días de edad (a) Muestra saturada (b) Variación de la resistencia a la compresión

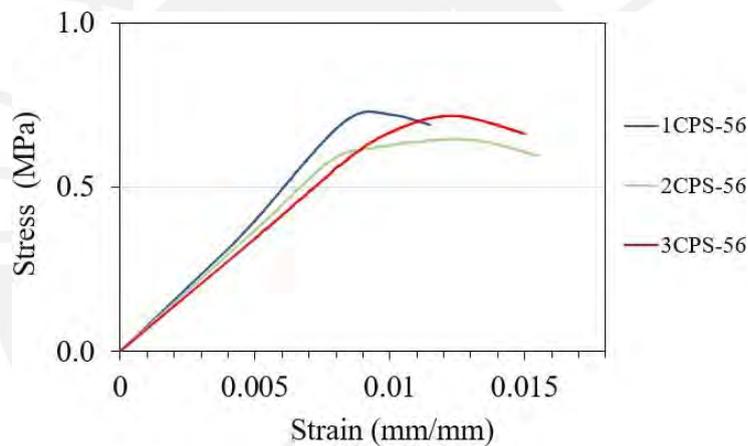


Figura 5.19: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana a los 56 días de edad en estado saturado

c) Resistencia a la flexión del BTCE con geopolímero de puzolana

El ensayo se realizó en base a los lineamientos de la norma BS EN 772-6 (2001) y según lo establecido en el Capítulo 3. Los especímenes de ensayo fueron BTCE con 15% de geopolímero de puzolana de 56 días de edad. En la Figura 5.20(a) se observa el montaje del ensayo y la Figura 5.20(b) se observa el modo de falla del espécimen. Los resultados del ensayo dieron un esfuerzo a la flexión de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana de 0.20 MPa con CV 23% a los 56 días de edad (ver Tabla 5.9). La Figura 5.21 muestra la curva de fuerza-deflexión del ensayo.

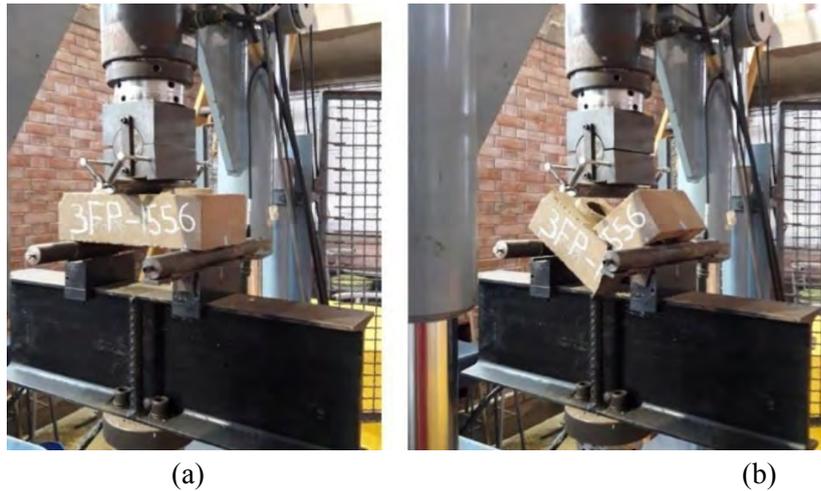


Figura 5.20: Ensayo de flexo-tracción sobre BTCE con geopolímero de puzolana a los 56 días (a) Montaje del ensayo en el LEDI (b) Falla de la muestra

Tabla 5.9. Esfuerzo a la flexión de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana de puzolana a los 56 días

Muestra	f_r promedio (MPa)	S (MPa)	CV
BTCE con 15% de puzolana activada	0.20	<0.1	23.2%

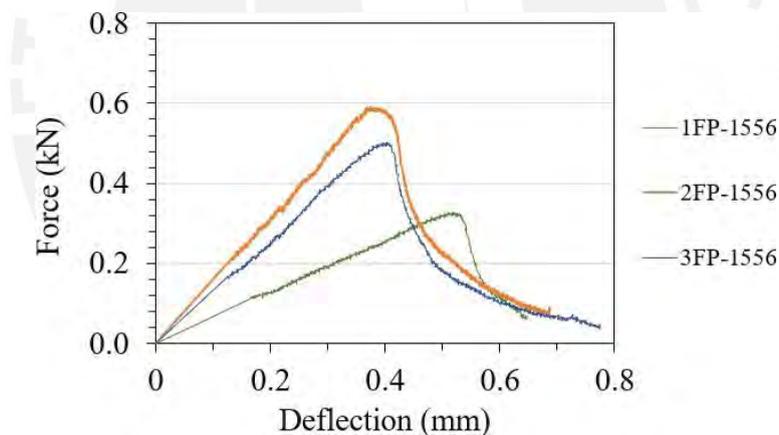


Figura 5.21: Curva de fuerza-deflexión de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana de puzolana a los 56 días de edad

5.3. Discusión de resultados

a) Estabilización química de suelos

La etapa de estabilización química abarco dos campos: estabilización química con cemento y estabilización química con geopolímero de puzolana. Se evaluó el comportamiento del suelo S-2 frente a distintos porcentajes de agente estabilizante: 5%, 8% y 10% de cemento en peso y 10% y 15% de puzolana en peso. Los resultados obtenidos del ensayo de la compresión a 28 días de edad de BTCE con distintos porcentajes de agente estabilizante se muestran en la Figura 5.22. Se eligió un porcentaje de agente estabilizante de cada tipo siguiendo un criterio de economía, calidad, y resistencia mecánica a la compresión, la cual

debe ser como mínimo 1.3 MPa según la norma UNE 41410 (2008). Para el caso de BTC estabilizada con cemento se determinó un porcentaje del 8% de cantidad en peso mientras que para la puzolana el 15%.

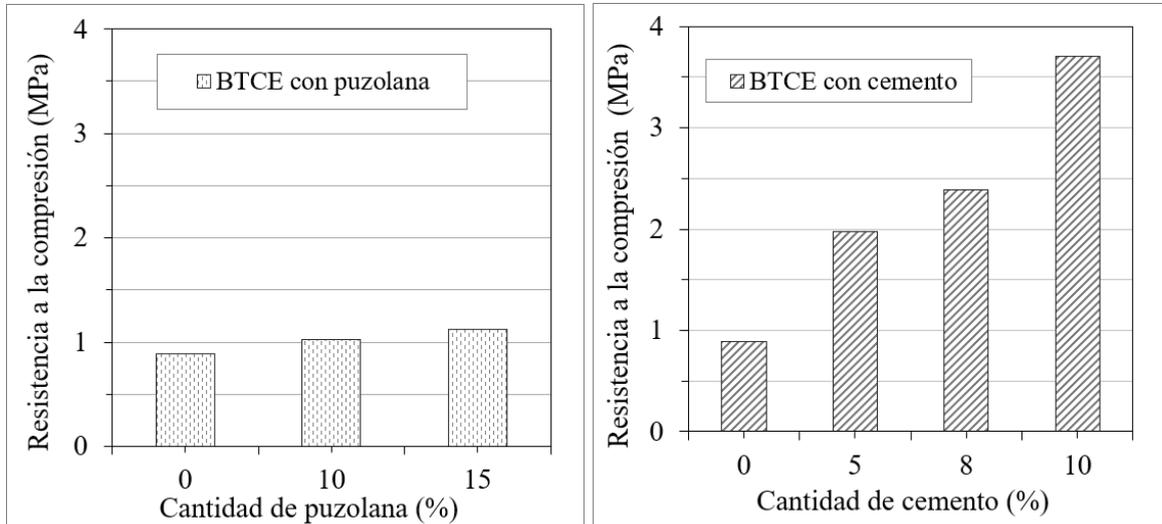


Figura 5.22: Comparación de resistencia a la compresión de BTC estabilizada con distintos porcentajes de agente estabilizante a los 7 días de edad

b) Resultados del ensayo a compresión

Esta etapa se estudiaron las propiedades mecánicas de compresión BTCE tanto con 8% de cemento como con 15% de puzolana. Para fines comparativos se realizaron, además, la caracterización de BTC sin agente estabilizante cuyos resultados sirven como línea base del estudio. Los BTCE con cemento, elaborados en base al suelo S-2 y 8% de cemento en peso y los BTC elaborados en base a al suelo S-2 con 15% de puzolana y 13% de activador alcalino fueron ensayados a las edades de 7, 14 y 28 días. Las curvas de evolución de resistencia de los tres tipos de BTC se observan en la Figura 5.23. La variación de los resultados de los resultados de resistencia a la compresión de los BTC con 8% de cemento y BTC con 15% de puzolana se determinaron en función del CV, los cuales se muestran en la Figura 5.24.

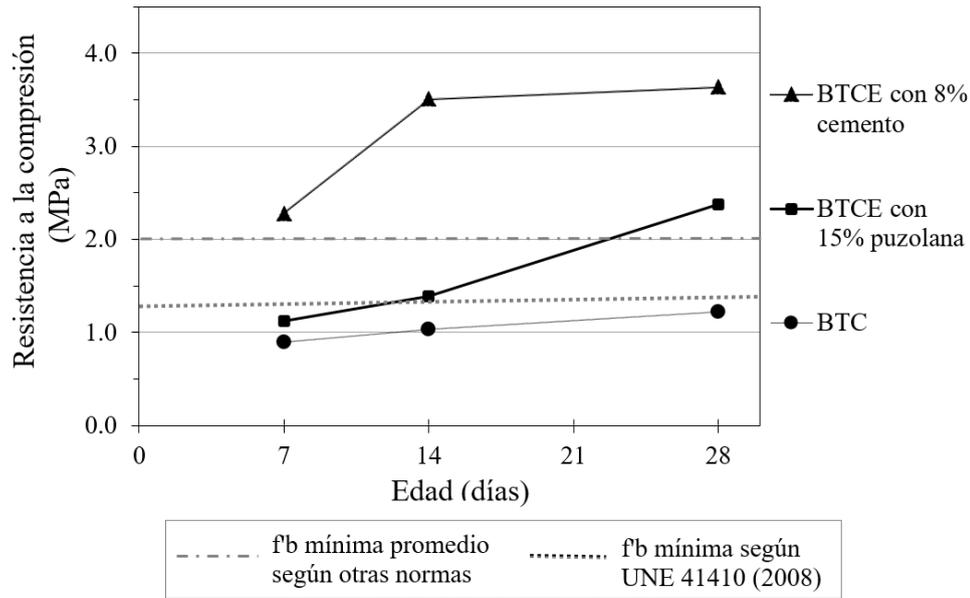


Figura 5.23: Comparación de las curvas de evolución de la resistencia a la compresión de BTC, BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana

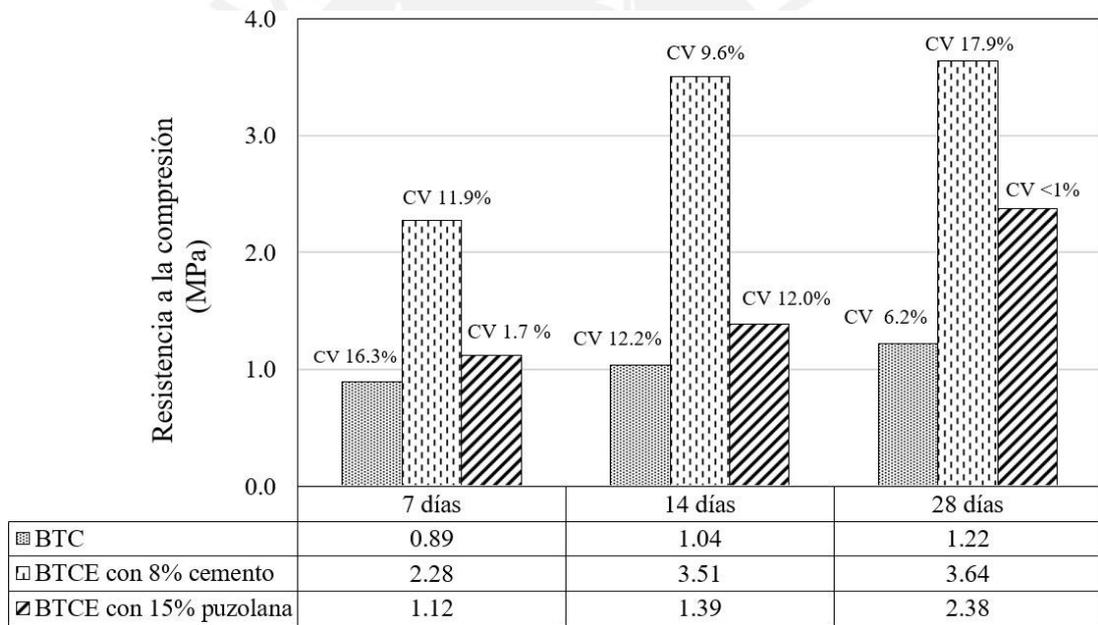


Figura 5.24: Resistencia a la compresión de las muestras de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de geopolímero de puzolana a los 7, 14 y 28 días de edad

Tabla 5.10. Módulo de elasticidad obtenido de la curva de esfuerzo – deformación del ensayo de compresión de BTC y BTC estabilizados a los 28 días de edad

Muestra	E (MPa)	CV
BTC	88.2	2%
BTC estabilizada con 8% cemento	249.9	3%
BTC estabilizada con 15% puzolana	208.5	3%

c) Resistencia mecánica a la compresión en estado saturado

La variación de la resistencia a la compresión en estado saturado se evaluó a los 56 días de edad en los BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de puzolana. Cabe resaltar que, el ensayo no fue practicado en BTC ya que al ser saturados por más de 5 minutos son destruidos. Se determinó el porcentaje de absorción de cada tipo de BTC. En el caso de BTCE con 8% de cemento se obtuvo un porcentaje de absorción de 9.1% y en los BTCE con 15% de puzolana alcalinamente activada un porcentaje de 10.3%. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.11 y se grafican en la Figura 5.25, donde se muestran los CV obtenidos de un promedio de 4 muestras.

Tabla 5.11. Resistencia a la compresión en estado saturado a los 56 días de BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana

Muestra	Resistencia a la compresión (MPa)	
	Seco	Saturado
BTC estabilizada con 8% de cemento	3.72	1.78
BTC estabilizada con 15% de puzolana	2.38	0.70

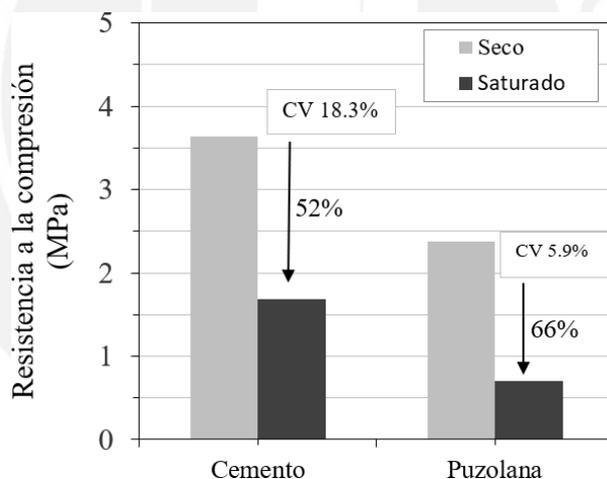


Figura 5.25: Resultados de la resistencia a la compresión en estado saturado a los 56 días

Tabla 5.12. Módulo de elasticidad obtenido de la curva de esfuerzo – deformación del ensayo de compresión de BTC y BTC estabilizados en estado saturado a los 56 días de edad

Muestra	E (MPa)	CV
BTC estabilizada con 8% cemento	170.0	7%
BTC estabilizada con 15% puzolana	73.5	5%

d) Resistencia a la flexión

El módulo de rotura del BTC, BTC con 8% de cemento y BTC con 15% de puzolana con activador alcalino fue obtenido a través del ensayo de flexión en tres puntos. Los resultados

obtenidos fueron calculados de acuerdo a los establecido en el acápite 4.4.2, donde el CV de los resultados fue del 1% en caso del BTC, del 11% en caso del BTC con 8% de cemento y 23% en caso del BTC con 15% de puzolana. En la Figura 5.26 se observan la variación de los resultados en un diagrama de barras.

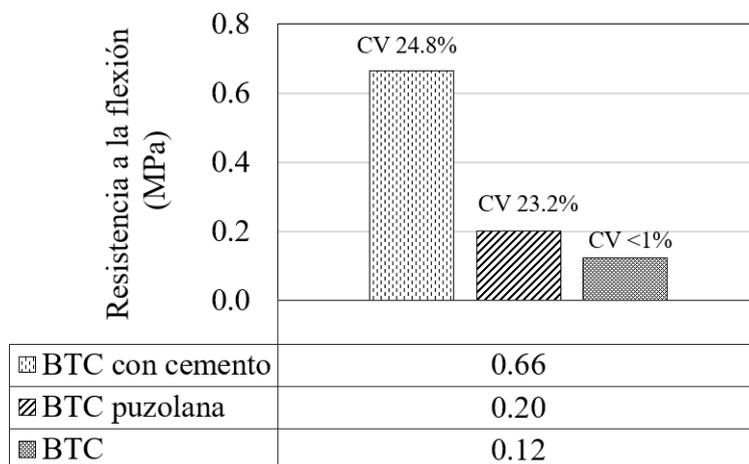


Figura 5.26: Variación del módulo de rotura de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de puzolana activada alcalinamente a una edad de 56 días

Tabla 5.13. Módulo de elasticidad obtenido de la curva de esfuerzo – deformación del ensayo de flexión en tres puntos de BTC y BTC estabilizados en estado saturado a los 56 días de edad

Muestra	E (MPa)	CV
BTC	45.29	3%
BTC estabilizada con 8% de cemento	304.50	17%
BTC estabilizada con 15% de puzolana	82.01	10%

CAPITULO 6. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LA MAMPOSTERÍA DE BTC DE JUNTA SECA

Resumen

En el presente capítulo se desarrolla la caracterización mecánica de primas elaborados en base a la interconexión de tres tipos de unidades: BTCL, BTC estabilizada con el 8% cemento y BTC estabilizada con 15 % de puzolana activada químicamente. El ensayo de compresión uniaxial es ejecutado para determinar las principales propiedades mecánicas de la mampostería de junta seca.

6.1. Descripción del sistema de mampostería de junta seca de BTC interconectado

La mampostería de junta seca es construida en base a la interconexión de BTC mediante un sistema endentado hembra – macho de 10 mm, los cuales se ubican tanto en la superficie del bloque como en su base (ver Figura 6.1). La técnica de interconexión de bloques es una solución que se ha propuesto hace algunas décadas como una alternativa al BTC tradicional con la finalidad de eliminar el uso de mortero y lograr un sistema constructivo más sencillo y económico. El sistema endentado de los bloques provee a la mampostería esfuerzos de corte, lo cual provee al sistema una resistencia frente a fuerzas sísmicas en regiones de moderada sismicidad. Adicionalmente, el sistema puede ser reforzado a través de los agujeros que presenta, lo cual no es el alcance de esta investigación.

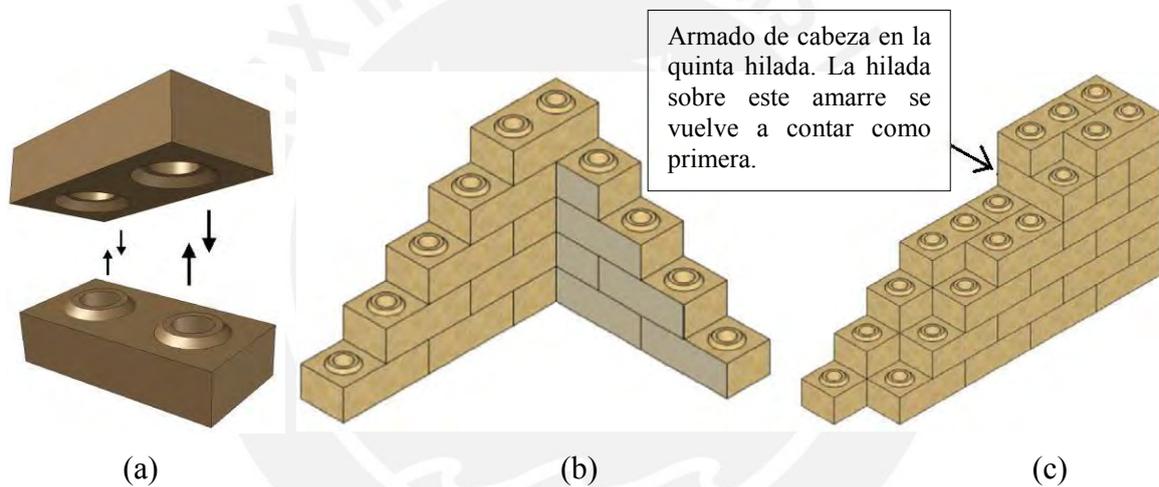


Figura 6.1: Mampostería de junta seca (a) Sistema de interconexión endentada hembra – macho de BTC (b) apilamiento de mampostería paño simple (c) apilamiento de mampostería de doble paño

6.2. Descripción de especímenes de ensayo

Los especímenes para evaluar el sistema de la mampostería de BTC interconectados consisten en prismas de 375x280x140 mm. La dimensión de los especímenes se determinó en base a las recomendaciones de la norma ASTM C1314-3b (2003), donde especifica que los prismas deben tener como mínimo dos bloques apilados no deben tener ninguna longitud menor a 100 mm. Adicionalmente, la norma indica que la relación entre la altura (h) y la mínima longitud (t_p) debe estar entre 1.3 y 5.0. la relación h/t_p de los especímenes fabricados es de 2.68, que cumple con la especificación de la norma. La construcción de los especímenes se realizó mediante el apilamiento de cinco unidades de BTC interconectados con el sistema de endentado de 10 mm y sin el uso de mortero. Cabe resaltar que, todas las

superficies de los BTC estaban libres de humedad y libre de partículas sueltas. El modo de apilamiento de los especímenes se observa en la Figura 6.2(a). La norma ASTM C1314-3b (2003) indica que si sobresale una nervadura mayor a 12.5 mm sobre la superficie del espécimen, este debe ser cortado desde su base. A pesar que, el sistema de endentado que sobresale del último BTC apilado es de 10 mm ha sido cortado para asegurar una distribución de la carga más homogénea. Cada espécimen es instrumentados con LDVTs verticales cuyas longitudes y ubicación se detallan en el Capítulo 3 y se muestran en la Figura 6.2(b). Finalmente, se han elaborado prismas de BTC y BTC estabilizada con 8% de cemento y 15% de puzolana activada alcalinamente, los cuales tiene una edad de 56 días. El detalle de los especímenes de ensayo se muestran en la Tabla 6.1

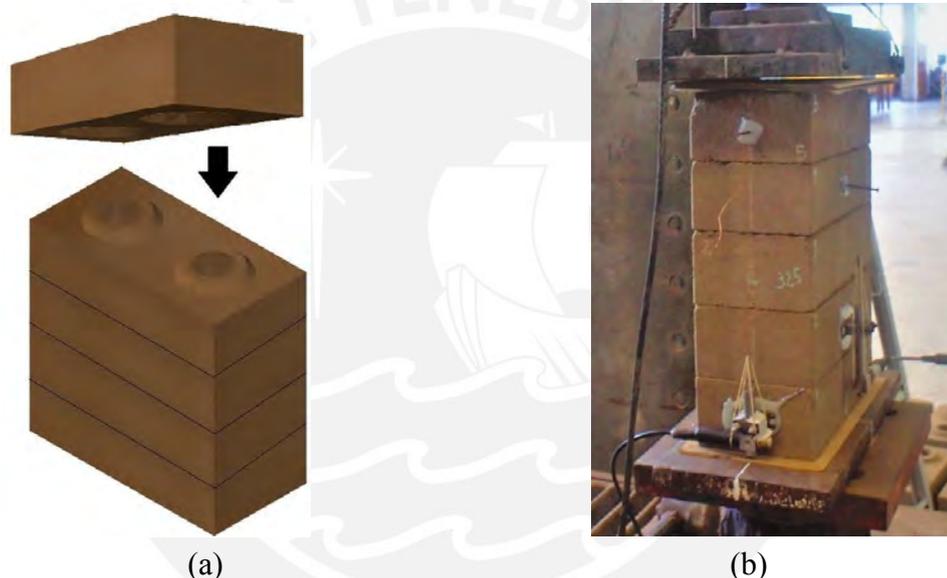


Figura 6.2: Prismas de BTC de 140x280x375 mm (a) procedimiento de construcción (b) espécimen de prueba instrumentado

Tabla 6.1. Detalle de muestras de ensayo a compresión uniaxial de prismas

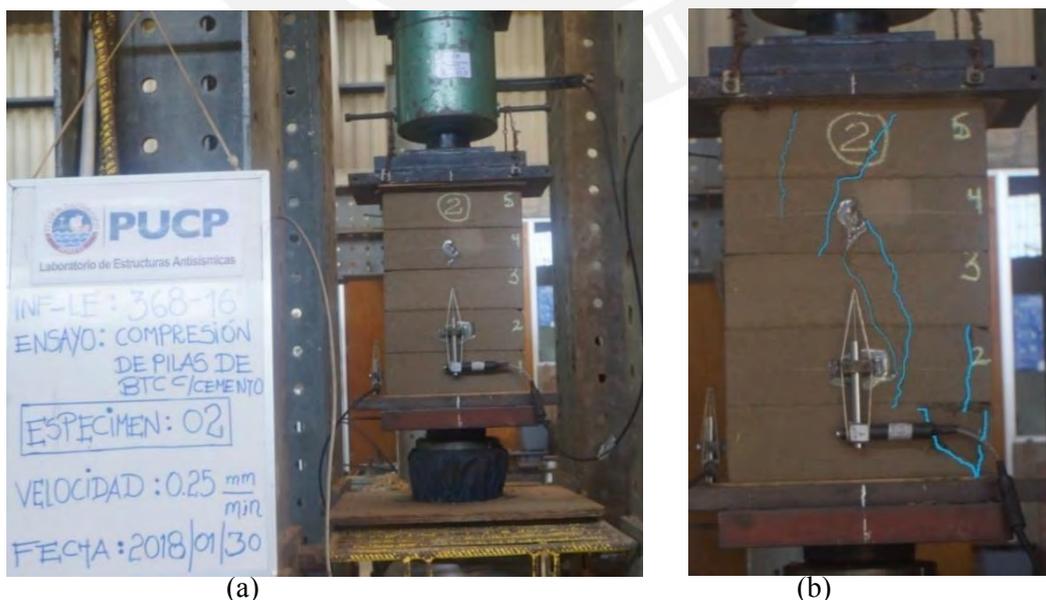
Tipo de muestra	Edad	Denominación	Ensayo	Cantidad
Prisma de BTC	56 días	P	Compresión	2
Prisma de BTC estabilizada con 8% de cemento	56 días	PC	Compresión	3
Prisma de BTC estabilizada con 15% de puzolana activada	56 días	PP	Compresión	3

6.3. Caracterización mecánica con ensayos de compresión uniaxial en prismas

La resistencia a la compresión de prismas se realizó en base a la norma ASTM C1314-3b, (2003), y según lo desarrollado en el Capítulo 3, acápite 3.3.1. Todas las muestras son debidamente instrumentadas para medir la deformación local. La Figura 6.3(a), Figura 6.4(a) y Figura 6.5(a) muestra el montaje de los ensayos. El patrón de fallas de los especímenes se muestra con color azul en la Figura 6.3(b), Figura 6.4(b) y Figura 6.5(b). El detalle de las muestras ensayadas se observa en la Tabla 6.1.



(a) (b)
 Figura 6.3: Ensayo de compresión de prismas de BTCT a los 56 días a) Montaje del ensayo en el LEDI b) Falla de la muestra



(a) (b)
 Figura 6.4: Ensayo de compresión de prismas de BTCEI con cemento a los 56 días a) Montaje del ensayo en el LEDI b) Falla de la muestra



Figura 6.5: Ensayo de compresión de prismas de BTCEI con geopolímero de puzolana a los 56 días
 a) Montaje del ensayo en el LEDI b) Falla de la muestra

Un total de 3 prismas de BTC interconectados fueron ensayados de donde se obtuvo un resultado promedio de f'_m de 0.38 MPa (CV <1%). Además, un total de 3 prismas de BTCE con 8% de cemento interconectados fueron ensayados, cuyo promedio de resultados de f'_m fue igual a 1.35 MPa (CV 4%). Así mismo, un total de 3 prismas de BTCE con 15% de puzolana activada alcalinamente interconectados fueron sometidos al ensayo de compresión de donde se obtuvo un resultado promedio de f'_m de 0.70 MPa (CV 9%). Los resultados se presentan en la Figura 6.6. Utilizando el factor de corrección por esbelteza de los prismas para una relación $h/t \sim 2.86$ de $k=1.066$ de acuerdo a la norma ASTM C1314-3b (2003), los valores de f'_m son de 0.40 MPa, 1.44 MPa y 0.75 MPa para prismas de BTCEI, BTCEI con 8% de cemento y BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente.

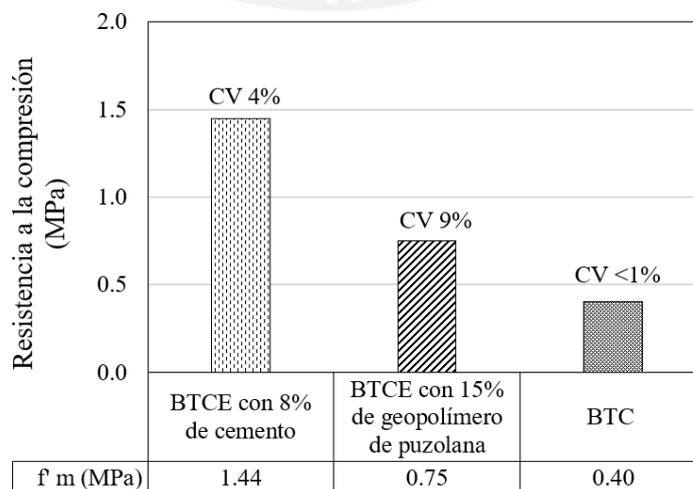


Figura 6.6: Variación de la resistencia a la compresión de mampostería (f'_m) de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de puzolana activada alcalinamente a una edad de 56 días

La Figura 6.7, Figura 6.8 y Figura 6.9 muestran la curva de esfuerzo y deformación del ensayo de los prismas de BTCEI, BTCEI con 8% de cemento y BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente. La deformación unitaria (ϵ) está representada como un valor adimensional, la cual fue local y global. La deformación unitaria local (ϵ_{local}) se obtuvo de LVDT's colocados sobre las muestras de ensayo según la configuración descrita en la sección 3.2.3. Las deformaciones unitarias fueron calculadas según la Ecuación (6.1), donde, ΔL es la variación de la longitud de cada registro y L_0 es la longitud inicial, considerando que $L_0=325$ mm para LVDT 1, $L_0=180$ mm para LVDT 2, y $L_0=140$ mm para la máquina de ensayo.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \tag{6.1}$$

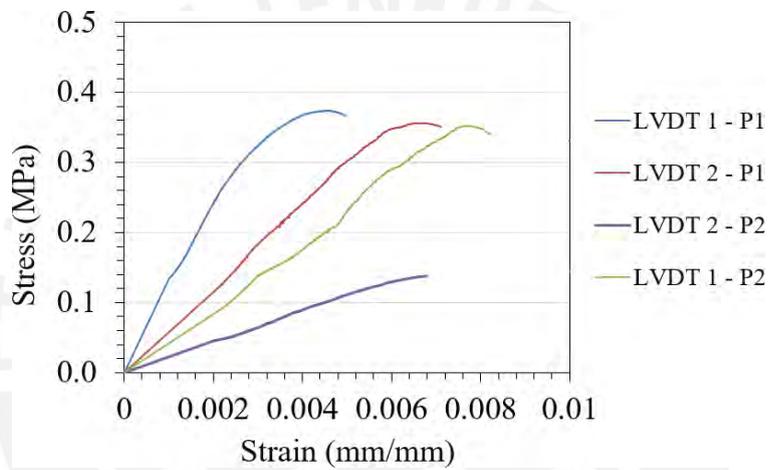


Figura 6.7: Curva de esfuerzo-deformación de BTC

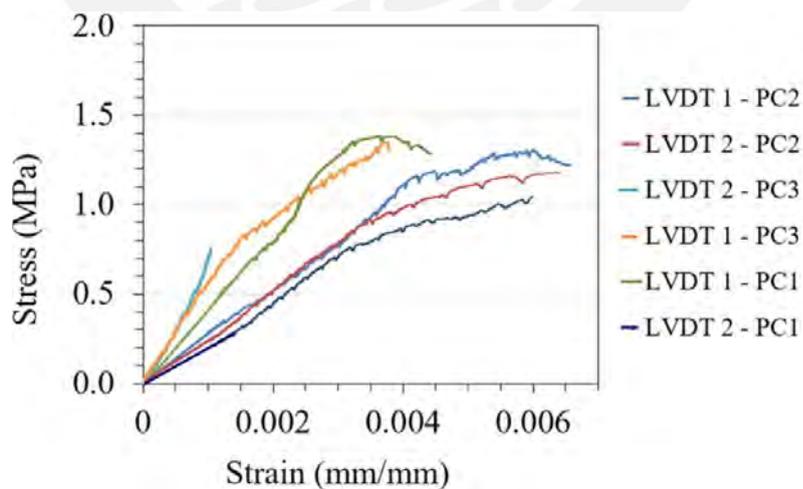


Figura 6.8: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 8% de cemento

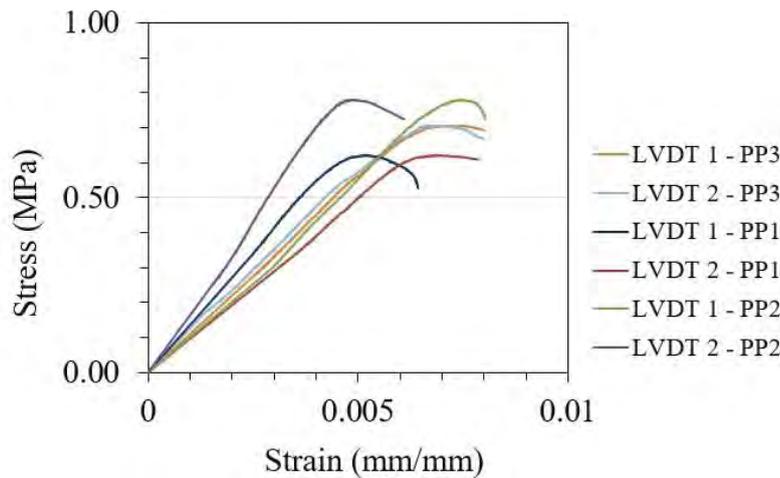


Figura 6.9: Curva de esfuerzo-deformación de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana

6.4. Discusión de resultados

El cálculo del módulo de Elasticidad se realizó según el método gráfico de la norma E111-17 (2017) y según lo establecido en el Capítulo 3. El cálculo del módulo de elasticidad para el prisma de BTC se calculó en base al promedio de la curva LVDT 2 – P1, LVDT 2 – P2 y se eliminó la curva de esfuerzo – deformación del registro LVDT 1 – P1 ya que su pendiente es muy alta en comparación de las demás. Así mismo, se eliminó la curva de esfuerzo – deformación del registro LVDT 1 – P2 ya que no tenía un registro completo producto del movimiento del LVDT colocado sobre el prisma. El valor de R o precarga se tomó como el 15% del esfuerzo máximo registrado y el límite de proporcionalidad en el 55% de esfuerzo máximo. El cálculo del módulo de elasticidad para el prisma de BTC estabilizada con 8% de cemento se calculó en base al promedio de todas las curvas del registro de LVDTs excepto de la curva LVDT 2 – PC3 por no poseer un registro completo y ser muy diferente a las anteriores. El valor de R o precarga se tomó como el 15% del esfuerzo máximo registrado y el límite de proporcionalidad en el 45% de esfuerzo máximo. El cálculo del módulo de elasticidad para el prisma de BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana se calculó en base al promedio de todas las curvas del registro de LVDTs. El valor de R o precarga se tomó como el 10% del esfuerzo máximo registrado y el límite de proporcionalidad en el 45% de esfuerzo máximo. La Figura 6.10 muestra la envolvente de las curvas de esfuerzo - deformación de los tres tipos de prismas de BTC que se han considerado para el cálculo del módulo de elasticidad.

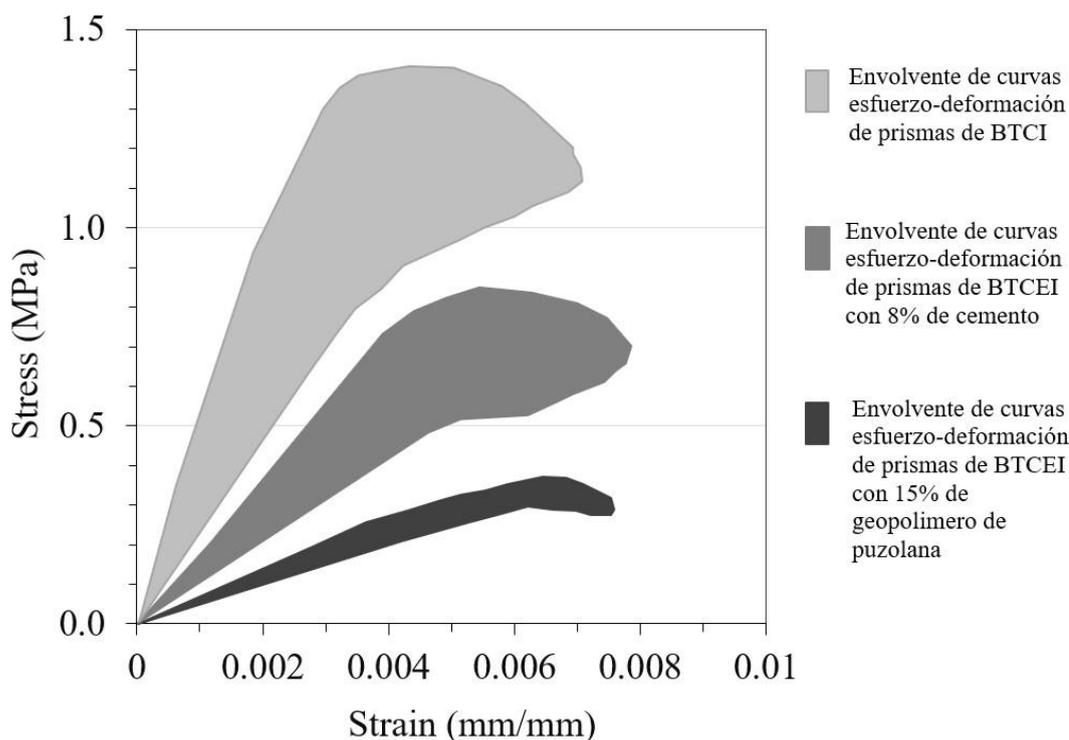


Figura 6.10: Envoltorio de curvas esfuerzo–deformación de prisma de BTC estabilizada con 15% de puzolana activada a los 56 días de edad

El promedio del Módulo de Elasticidad de BTCEI, BTCEI con 8% de cemento y BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana se observan en la Tabla 6.2. Así como también, se observan el coeficiente de Poisson y módulo de corte, los cuales se calcularon de acuerdo a lo establecido en el acápite 3.2.3.

Tabla 6.2. Propiedades de prismas de BTCEI, BTCEI con 8% de cemento y BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana a los 56 días de edad

Muestra	Parámetro	f'_m (MPa)	E (MPa)	ν	G (MPa)
Prismas de BTCEI	Resultado promedio	0.40	51.18	0.12	22.84
	CV (%)	<1%	15%	<1%	15%
Prismas de BTCEI con 8% de cemento	Resultado promedio	1.44	294.50	0.43	102.91
	CV	4%	11%	4%	10%
Prismas de BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana	Resultado promedio	0.75	120.79	0.22	49.33
	CV	9%	7%	9%	6%

CAPITULO 7. CONCLUSIONES



7.1. Conclusiones

La presente investigación se enfocó en estudiar las propiedades mecánicas de las unidades y prismas de bloques de tierra comprimida (BTC) estabilizada con cemento y geopolímero de para incentivar el uso de materiales económicos, ecosostenibles y resistentes en la construcción de viviendas sociales en el Perú. Inicialmente, se realizó un estudio de los antecedentes y se elaboró un programa de la campaña experimental dividida en tres partes:

i) Parte 1.- Corresponde al Capítulo 4, donde el proceso de elaboración y caracterización de BTC son desarrollados. Se detalló la caracterización física del suelo, se realizó el proceso de elaboración de BTC y se realizó la caracterización mecánica del BTC en términos de compresión y flexión.

ii) Parte 2.- Corresponde al Capítulo 5, donde el proceso de estabilización química del suelo y la caracterización de bloques de tierra comprimida estabilizada (BTCE) en términos de la compresión y la flexión son desarrollados. Además, se evaluó el comportamiento a compresión de los BTCE en estado saturado.

iii) Parte 3.- Corresponde al Capítulo 6, donde la caracterización mecánica de prismas de bloques de tierra comprimida estabilizada interconectada (BTCEI) con cemento y con geopolímero de puzolana. A partir de los resultados obtenidos del ensayo de compresión uniaxial de prismas se obtuvo los parámetros de resistencia a la compresión de la mampostería, el módulo de Elasticidad, el coeficiente de Poisson y el módulo de corte.

a) Geometría del BTC

La geometría estandarizada para el BTC fue 140x280 mm de base y 75 mm, con una interconexión de 10 mm ubicado en la parte superior e inferior del bloque y dos agujeros de 9 mm que traspasan el cuerpo transversalmente. El peso del BTC oscila en el rango de 4.8 – 5.2 kg, lo que permite que sea manipulable con una sola mano. El sistema de endentado (interconexión superior) presentó un comportamiento frágil, lo que conlleva a sugerir que los BTC sean manipulados con cuidado.

b) Suelo utilizado para la fabricación de BTC

Se analizaron las propiedades físicas de un suelo base (S-1) proveniente de Ventanilla, Callao, las cuales fueron mejoradas con la adición de arena (Ag-1) en una cantidad del 40%

en peso. De esta forma, se obtuvo un suelo mejorado (S-2), cuya curva granulométrica se encontró dentro del huso granulométrico propuesto por la norma UNE 41410 (2008). Además, la mezcla de suelo mejorado (S-2) tuvo 13.4% de contenido de arcilla, que fue idóneo para la fabricación de BTC y superó la exigencia de la norma UNE 41410 (2008), la cual indica que debe ser superior al 10%. Finalmente, se realizó el ensayo de proctor tipo estándar para determinar la máxima densidad de compactación y el contenido de humedad óptimo que resultó de 1872 kg/cm³ y 13.9% respectivamente. Estos últimos valores fueron determinantes para determinar el agua de diseño de la mezcla para fabricar los BTC.

c) Proceso de estabilización con cemento y geopolímero

El proceso de estabilización fue llevado a cabo con 5%, 8% y 10% de cemento y 10% y 15% de puzolana en peso. El objetivo de la etapa de estabilización de suelos para determinar un porcentaje óptimo de agente estabilizante para fabricar BTC que cumplan con la resistencia a la compresión normalizada de la norma UNE 41410 (2014) (mínimo 1.3 MPa). Se determinó que con 8% de cemento en peso la resistencia a la compresión a los 7 días es de 2.4 MPa (CV 5.5%) y con 15% de geopolímero de puzolana es de 1.1 MPa (CV 1.7%). En el caso del BTC estabilizada con cemento, se observó que a los 7 días de edad sobrepasan la resistencia mínima requerida con 5% de agente estabilizante. Sin embargo, la calidad de las BTC estabilizados con 8% de cemento eran superior al que estaba estabilizado con 5% de cemento y que el que estaba estabilizado con 10% no constituye una opción económica. Por esta razón, se escogió la fabricación de BTC estabilizados con cemento en una cantidad óptima del 8% en peso. En el caso de BTC estabilizada con geopolímero de puzolana, tanto el que tenía 10% y 15% de agente estabilizante poseían buen acabado y densidad. Sin embargo, ninguno llegó a la resistencia mínima a los 7 días de edad, por tal razón se escogió el que contenía mayor cantidad de agente estabilizante (15% de puzolana). Los BTC estabilizados con geopolímeros más ecosostenibles que el de cemento. Sin embargo, son más costosos debido al uso del activador alcalino. Es importante considerar que no se utilizó calor para fabricar los BTC con geopolímeros, y que fueron curados al aire libre bajo una temperatura media de 19°C. Se sugiere que, para optimizar la reacción geopolimérica se añada cationes de calcio o que se adapten hornos para el curado de los BTC.

d) Comportamiento mecánico a compresión de BTC y BTC estabilizados

La resistencia a la compresión de BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de geopolímero de puzolana a los 28 días resultó de 3.6 MPa (CV 17.9%) y 2.4 MPa (CV <1%) respectivamente y de BTC de 1.3 MPa (CV 6.2%). Los resultados del BTCE muestran un mejor resultado respecto a los BTC debido a la acción del agente estabilizante. Sin embargo, el BTCE con 8% de cemento muestra un mejor comportamiento a la compresión que el BTCE con 15% de geopolímero de puzolana. Los resultados obtenidos se clasifican según la norma UNE 41410, 2008, a los BTC y BTCE con 15% de puzolana en la clase de BTC1 (resistencia a la compresión mínima de 1.3 MPa) y a los BTCE con 8% de cemento en la clase de BTC2 (resistencia mínima 3 MPa). Además, el módulo de elasticidad (E) resultó 88.2 MPa (CV 2%), 249.9 MPa (CV 3%) y 208.5 MPa (CV 3%) para BTC, BTC estabilizada con 8% de cemento y BTC estabilizada con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente.

La resistencia a la flexión del BTC fue de 0.1 MPa (CV <1%) teniendo una relación con su resistencia a la compresión de 9.8%. Además, la resistencia a la flexión de BTCE con 8% de cemento fue de 0.7 MPa (CV 24.8%), donde la relación con su resistencia a la compresión es de 19%. Así mismo, la resistencia a la flexión de BTCE con 15% de geopolímero de puzolana fue de 0.20 MPa (CV 23.2%), donde la relación con su resistencia a la compresión es de 8.3%. El comportamiento de la resistencia a la compresión respecto a flexión del BTC y del BTCE con 15% de geopolímero de puzolana muestran una buena correlación entre ellos. Mientras que, la correlación entre la resistencia a la compresión respecto a la flexión de BTCE con 8% de cemento evidencia una notable diferencia.

e) Comportamiento mecánico a compresión uniaxial de prismas de BTC y BTC estabilizados

Las características de la mampostería de BTCEI y BTCEI con 8% cemento y 15% de geopolímero de puzolana fueron determinados mediante el ensayo de compresión uniaxial de prismas. La resistencia a la compresión de la mampostería de BTCEI resultó de 0.40 MPa (CV<1%) y de 1.44 MPa (CV 4%) y 0.75 MPa (CV 9%) para las mamposterías de BTCEI. Los valores obtenidos de la resistencia a la compresión de prismas de BTCEI con 8% cemento y BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana cumplen con las exigencias de la norma de Nueva Zelanda NZS 4597 (1998).

La determinación del módulo de Elasticidad se realizó en base a la curva de tendencia del rango elástico de cada curva obtenida del ensayo de compresión y según lo establecido en la norma ASTM E111-17 (2017). Así mismo, para obtener el coeficiente de Poisson se utilizó el criterio de Bosiljkov, et al. (2005), quienes recomendaron que el valor de este parámetro es el 30% de f'_m . No se usó la relación de la deformación vertical entre la deformación horizontal $\left(\frac{\epsilon_v}{\epsilon_h}\right)$ ya que los LVDTs horizontales no pudieron ser colocados sobre los

especímenes por falta de espacio longitudinal. La mampostería de BTCEI tuvo un resultado para el módulo de Elasticidad de $E=51.18$ MPa (CV 15%) y un coeficiente de Poisson de 0.12. La mampostería de BTCEI con 8% cemento tuvo un resultado para el módulo de Elasticidad de $E=294.50$ MPa (CV 11%) y un coeficiente de Poisson de 0.43. Así mismo, la mampostería de BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana tuvo un resultado para el módulo de Elasticidad de $E=120.79$ MPa (CV 9%) y un coeficiente de Poisson de 0.22.

El módulo de corte resultó de 22.84 MPa (CV 15%), 102.91 MPa (CV 10%) y 49.33 MPa (CV 6%) para la mampostería de BTCEI, BTCEI con 8% cemento y BTCEI con 15% de geopolímero de puzolana respectivamente. Los resultados muestran un significativo incremento de las propiedades de la mampostería de BTCEI respecto al BTCEI y además que la mampostería BTCEI cumplen con las exigencias de norma NZS 4597, 1998.

Los resultados experimentales indicaron que la resistencia de la mampostería de los prismas de junta seca de BTC es proporcional a la resistencia de las unidades BTC con relaciones de 0.33, 0.40 y 0.32 en el caso de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTC E con 15% de geopolímero de puzolana, tal como se muestra en la tabla

Tabla 7.1. Relación de la resistencia a la compresión de prismas (56 días) y unidades de BTC (28 días)

Muestra	f_b (MPa)	f_m (MPa)	f_b / f_m
BTC	1.22	0.4	0.33
BTCE con 8% de cemento	3.64	1.44	0.40
BTCE con 15% de geopolímero de puzolana	2.38	0.75	0.32

La respuesta de deformación de la mampostería de BTC, BTCE con 8% de cemento y BTCE con 15% de geopolímero de puzolana bajo carga a compresión es no lineal con comportamiento elástico inicial. Además, antes de que alcance la carga máxima de colapso, el espécimen puede seguir compactándose con la carga a compresión aplicada.

7.2. Futuro de la investigación

Se recomienda continuar la línea de investigación en las siguientes áreas:

- Respecto a suelo utilizado, se recomienda evaluar la influencia de la composición del suelo con la reacción química del geopolímero para obtener características químicas del suelo para su uso en este tipo de estabilización.
- Respecto a la estabilización de suelos con geopolímeros, se debe optimizar la solución del activador alcalino. La variación de la cantidad de silicato de sodio respecto a la cantidad de hidróxido de sodio son determinantes en la reacción polimérica. Por lo cual, se debe optimizar la ecuación química de estabilización.
- Respecto al curado de los BTC estabilizada con geopolímero, se recomienda estudiar la influencia del curado a diferentes temperaturas, ya que los geopolímeros desarrollan sus propiedades cementantes en temperaturas mayores a 40°C.
- Se aconseja estudiar las propiedades de corte de la mampostería de junta seca mediante en el ensayo de carga cíclica lateral con bajo carga vertical. La compresión diagonal en muretes, sería una prueba poco efectiva, ya que el sistema no presenta enlace horizontal.
- Se recomienda evaluar el desempeño frente a cargas sísmicas de una vivienda de BTC con refuerzo vertical, sistemas de reforzamiento estructural y el uso de morteros.



ANEXOS

ANEXO 1

Informe de resultados de fluorescencia de rayos X (XRF) de la puzolana



Informe de ensayo XRF

DES_ID_220318_17336_1 - PP1-S

28/03/2018 9:06:55 a. m.

Fecha de análisis: 22/03/18 5:50 p. m.

Método : UQ+S Calibración : UQ+ Calculado como : Oxides Nro. de caso : 0 = All known Atmósfera : Vacuum Tipo de film : PP 4mu	Diámetro medido = 29.00 mm Área medida = 660.52 mm ² Masa medida = 5794.32 mg Altura muestra = 3.00 mm
--	--

Resultados

Compuesto	WW % cc	Error Est.	WW % muestra
SiO2	53.55	0.37	
Al2O3	10.81	0.16	
K2O	4.07	0.10	
Na2O	2.30	0.08	
CaO	1.43	0.06	
Fe2O3	0.975	0.049	
MgO	0.553	0.028	
Cl	0.146	0.0073	
TiO2	0.128	0.0064	
MnO	0.0887	0.0044	
BaO	0.0785	0.0053	
P2O5	0.0447	0.0047	
S	0.0243	0.0025	
SrO	0.0178	0.0009	
Rb2O	0.0159	0.0008	
ZrO2	0.0146	0.0010	
ZnO	0.0081	0.0006	
La2O3	0.0054	0.0023	
Y2O3	0.0024	0.0009	
Ga2O3	0.0022	0.0006	

ANEXO 2

Análisis químico del hidróxido de sodio



NEW CHINA CHEMICALS CO., LTD

ADD: A1-1005 NEW SKYLINE STANDARD BUSINESS CENTER
NO.12 NANHAI ROAD TEDA TIANJIN 300457 CHINA

TEL: 86-22-66282330
FAX: 86-22-66282351

SUBJECT: NEW CHINA CHEMICALS CO., LTD. A1-1005 NEW SKYLINE STANDARD BUSINESS CENTER NO.12 NANHAI ROAD TEDA TIANJIN CHINA TEL: 0086 22 66282330 FAX: 0086 22 66282351		<h3>ANALYSIS CERTIFICATE</h3> <p>Original</p>	
		No. 17601	Date: FEB 26, 2017
Transport details: FROM QINGDAO, CHINA TO CALLAO, PERU BY SEA		P/O No. 3284-17	
		Terms of payment, T/T 90 DAYS AFTER B/L DATE	
Packages and numbers	Number and kind of packages; description of goods		
N/M	6,480 BAGS OF SODIUM HYDROXIDE PEARLS		
Name of Index	Standard	Result of Analysis	
		BATCH NO: 201701 MFG DATE: JAN, 2017 EXP DATE: JAN, 2019	
NaOH %	≥ 99.0	99.27	
NaCl %	≤ 0.03	0.01	
Fe ₂ O ₃ %	≤ 0.005	0.002	
Na ₂ CO ₃ %	≤ 0.5	0.3	
SIZE MM	-----	0.7 ± 0.1	
Pb PPM	-----	0.40	
As PPM	-----	0.088	
Hg PPM	-----	0.016	
Cl PPM	-----	0.001	
Cr PPM	-----	1.01	
Ni PPM	-----	1.4	
APPEARANCE	-----	WHITE PEARLS	

CONCLUSION: THE RESULT CONFORMS TO P/O No. 3284-17.

ANEXO 3

Análisis químico del silicato de sodio CERTIFICADO DE ANÁLISIS

RAZÓN SOCIAL : Abastecimientos Químicos CIATEX
PRODUCTO : Silicato de Sodio Neutro
FECHA DE EMISION : Lima, 21 de mayo del 2014
FECHA DE PRODUCCIÓN : 23/04/2014
FECHA DE VENCIMIENTO : Indefinido (a condiciones de almacenamiento)
LOTE : 450414

CARACTERISTICAS FISICOQUIMICAS

PARÁMETROS	RESULTADOS	ESPECIFICACIONES	MÉTODO DE ENSAYO
Apariencia	Líquido viscoso	Líquido viscoso	Visual
Olor	Inodoro	Inodoro	Organoléptico
Na ₂ O	8,45 %	8,00 % - 8,6 %	UNE 55-627-83
SiO ₂	28,10 %	28,0 % - 29,0 %	UNE 55-625-82
Densidad	40,2 Bé	40,0 ° Bé - 40,7° Bé	UNE 55-622-82
Gravedad Especifica	1,3836	1,3809 - 1,3902	-----
Rango	3,32	3,29 - 3,37	UNE 55-624-82
Sólidos Totales	36,55 %	36,0 % - 37,6 %	---



ANEXO 4

Informe de resultados de fluorescencia de rayos X (XRF) del suelo Ag-1



COMACSA
Car Minera
AGREGADOS CALCÁREOS S.A.

Informe de ensayo XRF

DES_ID-MR-573_240518 - PF1-C

8/6/2018 8:14:28 a.m.

CERTIFICADO DE ANÁLISIS N° 50376

Método	= UQ+C
Calibración	= UQ+_Feldespato
Calculado como	= Oxides
Nro. de caso	= 0 = All known
Atmósfera	= Vacuum
Tipo de film	= None

Diámetro medido	= 29.00 mm
Área medida	= 650.52 mm ²
Masa medida	= 5794.32 mg
Altura muestra	= 3.00 mm
Dilución	= 11.064 Li2O/Li2BaO7/LiBr

Resultados

Compuesto	WW % cc	WW % muestra
Al2O3	16.53	16.39
BaO	0.153	0.15
CsO	4.40	4.36
CdO	0.278	0.28
Fe2O3	7.79	7.73
K2O	2.72	2.70
MgO	1.62	1.61
Na2O	3.75	3.72
P2O5	0.145	0.14
SiO2	62.38	61.87
SrO	0.113	0.11
TiO2	0.929	0.92
V2O5	0.0352	0.03
Y2O3	0.0200	0.02
ZrO2	0.150	0.15
LOI		0.82

Ing. Gladys Palomino B.
 Jefe de Laboratorio

ANEXO 5

Informe de resultados de fluorescencia de rayos X (XRF) de la arena S-1

Informe de ensayo XRF

DES_ID-MR-574_240518 - PF1-C

8/6/2018 8:13:16 a.m.

CERTIFICADO DE ANÁLISIS N° 50377

Método	UQ+C	Diámetro medido	=	29.00	mm
Calibración	UQ+_Fe(despató)	Área medida	=	560.52	mm ²
Calculado como	Oxides	Masa medida	=	5794.32	mg
Nro. de caso	0 = All known	Altura muestra	=	3.00	mm
Atmósfera	Vacuum	Dilución	=	11.084	Li2O/Li2B4O7/LIBr
Tipo de film	None				

Resultados

Compuesto	WW % cc	WW % muestra
Al2O3	17.94	17.05
BaO	0.120	0.11
CaO	4.21	4.00
Co3O4	0.0105	0.01
Fe2O3	8.05	7.65
K2O	2.08	1.98
MgO	3.05	2.90
Na2O	2.59	2.46
P2O5	0.331	0.31
SiO2	50.25	57.25
SrO	0.117	0.11
TiO2	0.737	0.70
V2O5	0.0315	0.03
Y2O3	0.0301	0.03
ZnO	0.0206	0.02
ZrO2	0.0846	0.08
LOI		4.98

Ing. Gladys Palomino B.
Jefe de Laboratorio

ANEXO 6

Informe de resultados de fluorescencia de rayos X (XRF) del suelo S-2



Informe de ensayo XRF

DES_ID-MR-575_240518 - PF1-C

8/6/2018 8:11:16 a.m.

CERTIFICADO DE ANÁLISIS N° 50378

Método	: UQ+C				
Calibración	: UQ+ _Feldespato	Diámetro medido	=	29.00	mm
Calculado como	: Oxides	Área medida	=	660.52	mm ²
Nro. de caso	: 0 = All known	Masa medida	=	5794.32	mg
Atmósfera	: Vacuum	Altura muestra	=	3.00	mm
Tipo de film	: None	Dilución	=	11.064	L2Q/LI2B407/LBI

Resultados

Compuesto	WW % cc	WW % muestra
Al ₂ O ₃	16.39	15.80
BaO	0.130	0.13
CaO	4.62	4.45
Co ₃ O ₄	0.0090	0.01
Fe ₂ O ₃	7.54	7.27
K ₂ O	2.46	2.37
MgO	2.40	2.31
Na ₂ O	3.24	3.12
P ₂ O ₅	0.229	0.22
SiO ₂	61.88	59.64
SrO	0.132	0.13
TiO ₂	0.782	0.75
V ₂ O ₅	0.0350	0.03
Y ₂ O ₃	0.0525	0.05
ZnO	0.0111	0.01
ZrO ₂	0.110	0.11
LOI		3.62

Ing. Gladys Palomino B.
Jefe de Laboratorio

Referencias

- Aguilar, R., 2017. Applications of modern technologies for the seismic assessment of heritage constructions in Peru. *En 6th world conference on earthquake engineering. Santiago. Chilean association of seismology and earthquake engineering.*
- Anand, K. & Ramamurthy, K., 2005. Development and evaluation of hollow concrete interlocking block masonry system. *The Masonry Society Journal*, pp. 11-19.
- ASTM C1314-3b, 2003. *Standard Test Method for compressive Strength of Masonry Prisms*, s.l.: s.n.
- ASTM D1633-17, 2017. *Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders*, s.l.: s.n.
- ASTM D2216, 2010. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, s.l.: s.n.
- ASTM D422-63, 2007. *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, s.l.: s.n.
- ASTM D4318, 2017. *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, s.l.: s.n.
- ASTM D698, 2012. *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, s.l.: s.n.
- ASTM D854, 2014. *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, s.l.: s.n.
- ASTM E111-17, 2017. *Standard Test Method for Young's Modulus, Tangent Modulus, and Chord Modulus*.
- Bales, C. et al., 2009. *Interlocking Compressed Earth Blocks: From Soil to Structure*. California: Senior Project, Cal Poly San.
- Bei, G. & Papayianni, I., 2003. Compressive strength of compressed earth block masonry. *Transactions on the Built Environment Vol. 66*, pp. 367-376.
- Blondet, J., Vargas, J., Velasquez, J. & Tarque, N., 2006. Seismic reinforcement of adobe houses using external polymer mesh. *First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*.
- Blondet, M., Vargas, J. & Tarque, N., 2008a. *Observed behavior of earthen structures during the Pisco (Peru) earthquake of August 15, 2007*. Beijing, China, 14WCEE.
- Blondet, M., Villa Garcia, G., Svetlana, B. & Álvaro, R., 2011. *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial. EERI 2da Edition*.

Bosiljkov, V., Totoev, Y. & Nichols, J., 2005. Shear modulus and stiffness of brickwork masonry: an experimental perspective. *Structural Engineering and Mechanics, Vol 20*, pp. 21-44.

Browne, G., 2009. *Stabilised interlocking rammed earth blocks: alternatives to cement stabilisation*. s.l.:s.n.

CEN.EN772-1:2011, 2011. Methods of test for masonry units. Part 1: Determination of compressive strength. *European Committee for Standardization, Bruselas*.

CEN.EN772-6:2001, 2001. *Methods of test for masonry units. Determination of bending tensile strength of aggregate concrete masonry units*, s.l.: s.n.

Chan, C.-M. & Low, L.-P., 2010. Development of a Strength Prediction Model for "Green" Compressed Stabilised Earthbricks. *Journal of Sustainable Development*, pp. 140-150.

Cid, J., Mazarrón, F. R. & Cañas, I., 2011. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la Construcción, Vol. 63*, pp. 159-169.

Deboucha, S. & Hashim, R., 2010. A review on bricks and stabilized compressed earth blocks. *ISNN*.

Doat, P. H., Houben, H., Matuk, S. & Vitoux, F., 1991. Building with earth. *The Mud Village Society*.

Galán, C., Rivera, C. & Bradley, F., 2013. Ultrasonic, Molecular and Mechanical Testing Diagnostics in Natural Fibre Reinforced, Polymer-Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Polymer Science*, pp. 1-9.

Heath, A., Lawrence, M., Walker, P. & Fourie, C., 2009. *The compressive strength of modern earth masonry*. s.l., s.n.

Heathcote, K., 1991. Compressive Strength of Cement Stabilized Pressed Earth Blocks. *Building Research and Information*, pp. 101-105.

Houben, H. & Guillaud, H., 1994. *Earth construction: A comprehensive guide*. London, UK: ITDG Publishing.

INDECI, 2008. *INFORME DE EMERGENCIA N° 557 - 31/12/2008 / COEN-SINADECI*, Lima: s.n.

Jaafar, M. et al., 2006. Strength correlation between individual block, prism and basic wall panel for load bearing interlocking mortar-less hollow block masonry. *Construction and Building Materials*, pp. 492-498.

Maini, S., 2015. *Earthen Architecture in the World*. Auroville Earth Institute.

Marwan, M. & Uddin, N., 2015. Effect of Banana Fibers on the Compressive and Flexural Strength of Compressed Earth Blocks. *Buildings, ISSN 2075-5309*, pp. 282-296.

Miranda, T. et al., 2017. ICEBs stabilised with alkali-activated fly ash as a renewed approach for green building: Exploitation of the masonry mechanical performance. *Construction and Building Materials*.

- Monzon, F. M. & Oliden, J. C., 1990. *Tecnología y vivienda popular*. s.l.:s.n.
- Moquin, M., 1994. Ancient solutions for future sustainability: building with adobe, rammed earth, and mud. *The Adobe Journal*, pp. 543-552.
- Morel, J. & Pkla, A., 2002. A model to measure compressive strength of compressed earth blocks with the '3 points bending test'. *Construction and Building Materials* 16, pp. 303-310.
- NTE E.080, 2017. *E.080 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON TIERRA REFORZADA*, Lima: El Peruano.
- Pave, R., 2007. *Strength Evaluation of Dry-Stack Masonry*. University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa: s.n.
- Perera, A. & Jayasinghe, C., 2003. Strength Characteristics and Structural Design Methods for Compressed Earth Block Walls. *Masonry International*, 16(1), pp. 34-38.
- Qu, B. et al., 2015. Testing of flexure-dominated interlocking compressed earth block walls. *Construction and Building Materials*, Volume 83, pp. 34-43.
- Rocha, M., 2017. *CEB Dossier*. Badajoz: CEDACTerra.
- San Bartolomé, A. & Quiun, D., 2015. Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento de viviendas de adobe. *Revista de la facultad de ingeniería*, Volume 30, pp. 71-80.
- Silva, R. A. et al., 2014. Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, pp. 349-358.
- Sitati, S. & Starovoytova, D., 2015. A model for testing compressive and flexural strength of sisal fibre reinforced compressed earth blocks in the absence of laboratory facilities.
- Spence, R. J. S. & Cook, D. J., 1983. *Building Materials in Developing Countries*. Wiley & Sons Ltd..
- Stulz, R. & Mukerji, K., 1988. *Appropriate Building Materials: A catalogue of Potential Solutions*. Switzerland: Skat-Publications.
- Sturm, T., 2014. *Experimental characterization of dry-stack interlocking compressed earth block masonry*. Braga: s.n.
- Tarque, S. et al., 2010. Numerical modelling of in-plane behaviour of adobe walls. *En 8th National Conference on Seismology and Earthquake Engineering*, pp. 1-12.
- Toirac, J., 2008. El suelo como material de construcción. *Ciencia y Sociedad*, XXXIII, pp. 519-571.
- Torrealva, D., 2016. Static and dynamic testing for validating the polymer grid as external reinforcement in earthen buildings. *Brick and Block Mansory Conference*, pp. 873-879.
- UNE 41410, A., 2008. *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones específicas y métodos de ensayo*. España: AENOR.
- Walker, P., 1999. Bond characteristics of earth block masonry. *Journal of materials in civil engineering*, pp. 249-256.

Wheeler, G., 2005. Manual of Construction Interlocking Compressed Earth Blocks. *Center for Vocational Building Technology. Volume II.*

Zamer, M. M. et al., 2016. Influence of Ureolytic Bacteria Toward Interlocking Compressed Earth Blocks (ICEB) in Improving Durability of ICEB. *ISCEE*.

