

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL PARA MUROS CONSTRUIDOS CON
BLOQUES ESTABILIZADOS DE TIERRA COMPRIMIDA:
METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS EXPERIMENTAL**

Tesis para obtener el Título profesional de **Ingeniera Civil**

Autora:

Diana Carolina Zavaleta de la Cruz

Asesor:

Rafael Aguilar Vélez

Lima, agosto 2021

RESUMEN

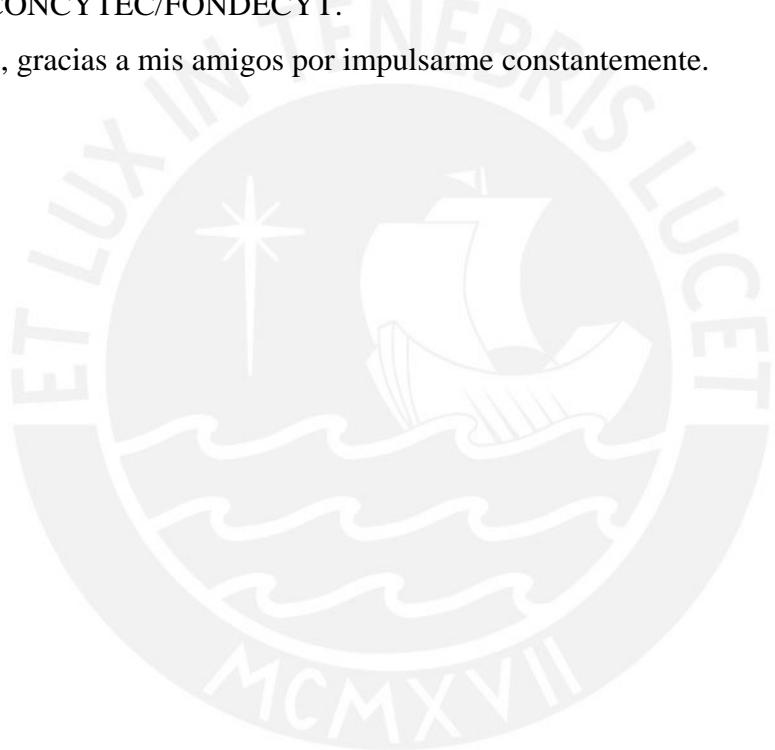
La construcción de sistemas estructurales con tierra es una técnica muy utilizada alrededor del mundo por la accesibilidad del recurso y simplicidad de producción. En el campo de la construcción con tierra, existe una serie de sistemas alternativos, entre ellos el más reciente los bloques de tierra comprimida (BTC). Estos incluyen en su proceso de fabricación estabilizantes que permiten mejorar las propiedades físicas y mecánicas de la tierra. Los bloques estabilizados de tierra comprimida (BTC-E) se presentan como una mejora de los adobes, siendo la principal ventaja el incremento de la resistencia mecánica y durabilidad aportada por el agente estabilizante. No obstante, las construcciones con BTC-E siguen siendo vulnerables ante sismos, por tanto, la presente tesis busca mejorar la capacidad sismoresistente de este tipo de albañilería con la implementación de un sistema superficial de reforzamiento sísmico. En este contexto, se propone una propuesta metodológica para la caracterización mecánica de sistemas de reforzamiento, la cual se desglosa en cuatro etapas. La primera analiza la materia prima, suelo y el refuerzo polimérico. La siguiente desarrolla un mortero estabilizado y evalúa la resistencia al agua de los morteros mediante ensayos que simulan condiciones climáticas que puedan presentarse en el país. Las últimas etapas estudian a la matriz (mortero + geomalla) de reforzamiento estructural por medio de la caracterización mecánica y la interacción entre el sistema de reforzamiento y de albañilería de BTC-E. Cada ensayo presentado es respaldado por las normativas nacionales e internacionales, como también por investigaciones previas que aseguran el propósito de ejecución. Al final de la investigación, se lleva a cabo una campaña experimental para validar las dos primeras etapas de la metodología descrita. Los resultados demostraron la adecuada selección de los ensayos y orden de ejecución para la selección de los materiales, y el desarrollo de morteros durables y compatibles con el sistema de BTC-E.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradecer a Dios, a mis padres y mi hermanito, por su apoyo, compresión y eterno amor.

Asimismo, quiero reconocer al Profesor Rafael Aguilar por todo el apoyo brindado durante esta la investigación, y por orientarme, tanto en mi vida académica como personal, con sus múltiples consejos. Además, agradecer la oportunidad de permitirme trabajar en el grupo de investigación Engineering & Heritage (E&H), pues no solo me permitió conocer a un grupo increíble de personas y profesionales; sino también, formar parte del Proyecto N° ID 678 “BTC Ensamblable” llevado a cabo por la Sección de Ingeniería Civil de la PUCP y financiado por CONCYTEC/FONDECYT.

Por último, gracias a mis amigos por impulsarme constantemente.



ÍNDICE

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. MOTIVACIÓN	2
1.3. ANTECEDENTES	2
1.4. OBJETIVOS	4
1.5. ORGANIZACIÓN.....	5
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1 BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC)	6
2.1.1 Aplicación del BTC en la construcción	6
2.1.2 Normativa existente sobre la construcción con BTC	8
2.1.3 Estabilización química del BTC	11
2.1.4 Ensayos de caracterización mecánica	14
2.1.5 Acción sísmica en construcciones con BTC.....	19
2.2 MATRIZ DE REFORZAMIENTO SÍSMICO	20
2.2.1 Importancia del mortero para la matriz.....	21
2.2.2 Normativa existente para la caracterización, estabilización y fabricación de morteros	22
2.2.3 Estudio de durabilidad del mortero.....	24
2.2.4 Tipos de refuerzos sísmico y la caracterización mecánica.....	25
2.2.5 Aplicación de la geomalla como refuerzo sísmico	29
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL REFUERZO ESTRUCTURAL DE SISTEMAS DE ALBAÑILERÍA DE BTC-E	32
3.1 METODOLOGÍA PROPUESTA	32
3.2 ETAPA 1: ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA: SUELO Y REFUERZO	35
3.2.1 Ensayos para la caracterización del suelo base (SB)	35
3.2.2 Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo SB	40
3.2.3 Selección del refuerzo superficial	41
3.3 ETAPA 2: OBTENCIÓN DEL MORTERO ESTABILIZADO Y EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD.....	45
3.3.1 Proceso de estabilización química y producción	46
3.3.2 Ensayos para la caracterización física del mortero	47
3.3.3 Ensayos para la caracterización mecánica del mortero.....	48
3.3.4 Ensayos para la evaluación de la durabilidad frente a erosión por agua	50
3.4 ETAPA 3: DESARROLLO DE LA MATRIZ PARA EL REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL.....	56
3.4.1 Ensayo de tracción directa	57
3.4.2 Ensayo de flexión en cuatro puntos	59
3.4.3 Ensayo de adherencia.....	60
3.5 ETAPA 4: EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE ALBAÑILERÍA REFORZADA	64
3.4.4 Proceso de cosntrucción del sistema de albañilería de BTC-E reforzado	64
3.4.5 Ensayo de compresión diagonal.....	65
3.5.1 Ensayo de corte cíclico	67
3.5.2 Ensayo en mesa vibratoria de módulos escalados.....	68
CAPÍTULO 4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL PARA LA VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DESARROLLO DE MORTEROS PARA EL REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL.....	70
4.1 ETAPA 1: ANÁLISIS DE LA MATERIA PRIMA	70
4.1.1 Caracterización del suelo SB	70
4.1.2 Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo SB	75
4.1.3 Geomalla.....	76
4.2 ETAPA 2: OBTENCIÓN DEL MORTERO ESTABILIZADO Y EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD.....	77

4.2.1	Descripción de materiales	77
4.2.2	Proceso de estabilización química	77
4.2.3	Proceso de producción del mortero.....	78
4.2.4	Caracterización física y mecánica del mortero	79
4.2.5	Evaluación de la durabilidad del mortero	85
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....		97
5.1	CONCLUSIONES.....	97
5.2	TRABAJO FUTURO	99
REFERENCIAS		100



LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Construcciones con tierra a nivel mundial (De Sensi, 2003).....	6
Figura 2.2: Prensas para la producción de BTC: a) Manual mecánica e b) Hidráulica motorizada (Adam & Agib, 2001)	7
Figura 2.3: Proceso de fabricación de BTC: a) preparación de la tierra, b) tamizado por la malla #4, c) estabilización del suelo con cemento, d) colocación del material en la máquina, e) almacenamiento de los BTC-E y f) curado hermético (Ramos et al., 2014).....	8
Figura 2.4: a) Zona ideal de suelo para la construcción y b) zona recomendada para la plasticidad de suelos (UNE 41410, 2008).....	9
Figura 2.5: a) Geometría del BTC-E e b) interconexión de junta seca mediante edentaciones	10
Figura 2.6: Capacidad de los suelos arcillosos (Kinuthia, 2015)	11
Figura 2.7: Criterio de selección de los estabilizantes según las características del suelo (Hall et al., 2012)	12
Figura 2.8: Resistencia a compresión según el contenido de arcilla (Venkatarama Reddy, 2012).....	12
Figura 2.9: Resistencia a la compresión respecto al contenido de cemento (Houben & Guillaud, 1994)	13
Figura 2.10: Resistencia a la compresión en base a la cantidad de cal a 28 días (Venkatarama, 2012)	14
Figura 2.11: El ensayo de compresión uniaxial: a) Configuración y b) resultados (Alvarez, 2018)	15
Figura 2.12: Sistema de albañilería de BTC-E: a) pilas, b) muretes y c) muros	16
Figura 2.13: Ensayo de compresión uniaxial en primas: a) Configuración y b) resultados (Alvarez, 2018)	17
Figura 2.14: Ensayo de corte en pilas: a) Configuración y b) curva de esfuerzo cortante - esfuerzo normal (Sturm et al, 2015)	18
Figura 2.15: Ensayo de corte cíclico en muros: a) Fallas y b) curvas fuerza lateral – deformación (Qu et al., 2015)	19
Figura 2.16: Típicas fallas por cargas horizontales dentro del plano: a) por corte, b) deslizamiento y c) flexión	19
Figura 2.17: Huso granulométrico del suelo como material de construcción (ARS 681, 1996).....	23
Figura 2.18: a) Muros de albañilería reforzados y b) detalle de la matriz: refuerzo de fibra de carbono y mortero cementicio (Babaeidarabad et al., 2013)	26
Figura 2.19: Campaña experimental de Carozzi et al. (2020): a) Ensayo de pull-out, b) de tracción uniaxial directa y c) de adherencia.....	27
Figura 2.20: Campaña experimental de Garcia-Ramonda et al. (2020): a) muros reforzados en una dirección (vertical) y b) dos direcciones (horizontal y vertical), c) ensayo de compresión diagonal ...	28
Figura 2.21: Modelo de vivienda de adobe con reforzamiento estructural: a) de tiras de neumáticos, b) de malla plástica y c) de geomalla (Torrealva, Blondet, Vargas, Tarque, & Velásquez, 2006)	29

Figura 2.22: Campaña experimental de Astorga (2011): a) Detalle de la colocación de la matriz, b) antes del y b) después del ensayo de corte cíclico	30
Figura 2.23: Campaña experimental de Holliday et al. (2016): a) Detalle del sistema de reforzamiento, b) configuración del ensayo y muro de BTC-E reforzado después del ensayo.....	30
Figura 2.24: Campaña experimental de : a) Detalle del sistema de reforzamiento, b) ensayo de los muros reforzados y c) ley momento curvatura obtenida	31
Figura 3.1: Metodología para la caracterización mecánica y evaluación de la durabilidad de matrices para el reforzamiento sísmico de sistemas de albañilería de BTC-E.....	34
Figura 3.2: Ensayo de contenido de humedad: a) se coloca 100 gr de suelo natural en el horno por 24 horas a 60°C, b) 24 horas después se retira y se pesa el suelo seco.....	35
Figura 3.3: Ensayo de Gs: a) picnómetro (W_p), b) picnómetro con agua destilada ($W_w + p$), c) picnómetro y suelo seco ($W_s + p$) d) 65 gr de muestra de suelo seco y agua destilada en la bomba de vacío e) picnómetro con la muestra y agua destilada sin burbujas después de 12 horas ($W_w + s + p$)	36
Figura 3.4: Ensayo de análisis granulométrico: a) mallas utilizadas para separar las partículas b) dispersión de los finos en la batidora c) cilindro de sedimentación con la muestra en hexametafosfato de sodio y agua destilada d) lecturas con el hidrómetro	38
Figura 3.5: Ensayo de límite líquido: a) muestra en la Cuchara de Casagrande divida por el ranurador, b) cierre de ranura alrededor de 13 mm. c) Ensayo de límite plástico: se forma rollitos de 3.2 mm de diámetro. d) Al finalizar ambos ensayos, las muestras se colocan en el horno por 24 horas.....	39
Figura 3.6: Mejoramiento de la curva granulométrica del suelo SB.....	41
Figura 3.7: Tipos de geomalla: a) Uniaxial, b) Biaxial y c) Triaxial (https://www.geogridfabric.com)	42
Figura 3.8: Esquema del espécimen de refuerzo.....	45
Figura 3.9: Curva típica esfuerzo - deformación	45
Figura 3.10: a) Mezclado de los materiales secos: suelo SMM y estabilizante, b) Añadir $\frac{3}{4}$ de agua y mezclar a velocidad baja, c) detener el mezclado para limpiar las paredes del recipiente y d) se obtiene una mezcla homogénea. e) Con el mortero en estado fresco, se prepara las muestras colocando la mezcla en dos capas. f) Por último se almacenan hasta su ensayo	47
Figura 3.11: Ensayo de esparcimiento: a) instrumento b) retiro del contenedor para después sacudir la mesa c) medida del esparcimiento del mortero.....	48
Figura 3.12: Configuración del ensayo de compresión en muestras cúbicas de 50 mm.....	49
Figura 3.13: Ensayo de flexión en tres puntos: a) la colocación en la máquina de prueba y b) configuración del ensayo	50
Figura 3.14: Esquema de los ángulos de contacto del ensayo de permeabilidad.....	51
Figura 3.15: Configuración del ensayo de absorción por capilaridad.....	52
Figura 3.16: Configuración del ensayo de absorción total.....	53
Figura 3.17: Esquematización del ensayo: a) humectación y b) secado	54
Figura 3.18: Configuración del ensayo de erosión por goteo	55

Figura 3.19: Configuración del ensayo de erosión acelerada adaptada	56
Figura 3.20: Configuración del ensayo de tracción	57
Figura 3.21: Proceso de fabricación del espécimen del ensayo de tracción: a) molde, b) llenar el molde con una capa fina de 5 – 10 mm de mortero, c) colocar la geomalla en el centro, d) agregar otra capa de mortero de espesor igual a la primera	58
Figura 3.22: Curva típica trilineal del ensayo de tracción	59
Figura 3.23: Configuración del ensayo de flexión en cuatro puntos.....	60
Figura 3.24: Ensayo de adherencia: esquema del espécimen	61
Figura 3.25: Ensayo de adherencia: esquema de instrumentación.....	62
Figura 3.26: Curva típica de esfuerzo - deslizamiento del ensayo de adherencia.....	63
Figura 3.27: Ensayo de adherencia: Mecanismos de desprendimiento (adaptado de Ghiassi et al., 2016)	64
Figura 3.28: Proceso de reforzamiento de la albañilería de BTC-E	65
Figura 3.29: Configuración del ensayo de compresión diagonal	66
Figura 3.30: Ensayo de corte cíclico: esquema del espécimen	67
Figura 3.31: Ensayo de corte cíclico: esquema de instrumentación	68
Figura 3.32: Esquema de la instrumentación para el ensayo de módulos en mesa vibratoria (Blondet et al., 2006)	69
Figura 4.1: Extracción de muestras del suelo SB proveniente de Carabayllo.....	70
Figura 4.2: Ensayo de contenido de humedad: a) Se colocó aproximadamente 100 gr de suelo SB en estado natural en el horno b) 24 horas después se retiró y peso el suelo SB en estado seco	71
Figura 4.3: Ensayo de Gs: a) Los picnómetros son llenados con agua destilada hasta la marca señalada y se registró la masa b) se agregó 40 gr de suelo SB seco y agua destilada hasta cubrir y se dejó reposando por 15 minutos c) se retiró el aire atrapado con la bomba de vacío durante 25 minutos d) se agregó agua destilada hasta la marca y se dejó reposar hasta el día siguiente para pesar.....	71
Figura 4.4: Muestras para el análisis granulométrico a) S-1, b) S-2 y c) S-3 extraídas del suelo SB.....	72
Figura 4.5: Ensayo de análisis granulométrico: a) mallas utilizadas para las gravas y b) los finos. b) Dispersión de los finos con hexametafosfato de sodio y agua destilada con la batidora d) Cilindro de sedimentación que contiene los finos en hexametafosfato de sodio y agua destilada e) lecturas con el hidrómetro.....	73
Figura 4.6: Envolvente granulométrica del suelo SB y husos granulométricos según la Norma ARS 681 (1996).....	73
Figura 4.7: Ensayo de límite líquido: a) Porción de muestra en la Cuchara de Casagrande dividida mediante un ranurador b) Porción de muestra unida mediante el golpeteo continuo de la cuchara. c) Ensayo de límite plástico: formación de un rollito de 3.2 mm de diámetro. d) Despues de los ensayos, las muestras se colocan en cápsulas para ser secadas en el horno	74
Figura 4.8: Envolvente granulométrica del suelo SMM y husos granulométricos de la Norma ARS 681 (1996).....	76

Figura 4.9: Esparcimiento del mortero en la mesa de flujo: a) vista frontal y b) vista superior	79
Figura 4.10: Capacidad de esparcimiento de los morteros estabilizados y la relación de la consistencia en base a la opinión del operador.....	80
Figura 4.11: Ensayo de compresión uniaxial: a) Maquina de prueba, b) ejecución del ensayo y c) espécimen ensayado.....	81
Figura 4.12: Evolución de la densidad de los morteros de tierra a) con 10% y b) con 20% de estabilizante.....	82
Figura 4.13: Evolución de la resistencia a compresión de los morteros estabilizados al 10% (fase 1)	82
Figura 4.14: Evolución de la resistencia a compresión de los morteros estabilizados al 20% (fase 2)	83
Figura 4.15: Ensayo de flexión en tres puntos: a) Maquina de prueba adaptada y b) el espécimen después del ensayo.....	84
Figura 4.16: Evolución del esfuerzo a flexión de los morteros óptimos estabilizados al 20%	84
Figura 4.17: Correlación entre la resistencia a compresión y el esfuerzo a flexión.....	85
Figura 4.18: Ejecución del ensayo de permeabilidad.....	87
Figura 4.19: Resultados de permeabilidad de los especímenes de morteros óptimos.....	88
Figura 4.20: Curvas de absorción capilar de agua para los morteros a) sin y b) con estabilizante	90
Figura 4.21: Despues de 5 minutos de iniciado el ensayo: a) mortero S y morteros estabilizados b) SC20 (100%) y c) SCL20 (75%)	90
Figura 4.22: Curvas de absorción total de agua para los morteros estabilizante	91
Figura 4.23: Despues de 10 minutos de iniciado el ensayo: a) mortero S y morteros estabilizados b) SC20 (100%) y c) SCL20 (75%)	92
Figura 4.24: Ejecución del ensayo de erosión por goteo: detalle de espécimen	92
Figura 4.25: Resultados de erosión por goteo de los especímenes de morteros óptimos	93
Figura 4.26: Ensayo de erosión acelerada: a) Equipo de simulación de lluvias con sistema recirculante, b) manómetro de 100 psi que regula la presión y c) salida de agua.....	95
Figura 4.27: Resultados de erosión acelerada de los especímenes de morteros óptimos.....	96

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Documentos normativos existentes	9
Tabla 2.2: Investigaciones sobre la caracterización física y química de los BTC	10
Tabla 2.3: Estabilizante sugerido según el tipo del suelo (adaptado de Burroughs, 2001).....	12
Tabla 2.4: Tipo de arcilla y contenido óptimo para cada suelo (adaptado de Venkatarama, 2012)	14
Tabla 2.5: Propiedades mecánicas de los BTC y BTC-E.....	15
Tabla 2.6: Resistencia a la compresión mínima requerida (adaptado de Alvarez, 2018)	15
Tabla 2.7: Módulo de ruptura mínima según normativa (Alvarez, 2018).....	16
Tabla 2.8: Propiedades mecánicas de la albañilería de los BTCl y BTCl-E	17
Tabla 2.9: Mecanismo de falla en construcciones de tierra por acciones símicas (adaptado de Lacouture et al., 2007)	20
Tabla 2.10: Investigaciones sobre la caracterización física y mecánica del mortero.....	23
Tabla 2.11: Investigaciones sobre la evaluación de la durabilidad de elementos de tierra.....	25
Tabla 3.1: Composición granulométrica de un suelo como material de construcción.....	37
Tabla 3.2: Límites plasticidad del suelo como material de construcción.....	38
Tabla 3.3: Geomallas disponibles en el mercado de acuerdo al polímero de composición	43
Tabla 3.4: Valores de espaciamiento para morteros de tierra estabilizada.....	48
Tabla 3.5: Criterio de evaluación del ensayo de absorción total (adaptada de Esteve, 2016)	53
Tabla 3.6: Escala de erosionabilidad para el ensayo de erosión por gota	55
Tabla 3.7: Escala de erosionabilidad por erosión acelerada (adaptada de NZS 4298, 2020)	56
Tabla 4.1: Composición química del suelo SB por espectroscopía de fluorescencia de rayos X.....	75
Tabla 4.2: Resultados de la caracterización física del suelo SB	75
Tabla 4.3: Composición granulométrica del suelo SB y SMM	76
Tabla 4.4: Límites de consistencia del suelo SMM	76
Tabla 4.5: Propiedades mecánicas de la geomalla biaxial Tensar BX 1100.....	77
Tabla 4.6: Formulación de las dosificaciones	78
Tabla 4.7: Especímenes de mortero considerados para los ensayos de durabilidad	86
Tabla 4.8: Índice de erosionabilidad propuesto para el ensayo de erosión por goteo.....	94
Tabla 4.9: Índice de erosionabilidad propuesto para el ensayo de erosión acelerada	96

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. Introducción

El Censo Nacional del INEI (2017) estima que para el 2070 habría alrededor de 40 millones de habitantes en el Perú, lo cual indica un crecimiento considerable de la población, por consiguiente, del número de viviendas. La sobredemanda implicaría un problema cuando la población no sea capaz de cubrir las necesidades básicas por falta de recursos económicos (Alvarez, 2018). La encuesta Nacional de Hogares del INEI (2017) señala que, la pobreza se ha incrementado en 375 mil personas, es decir, existe un sector de la población que no son económicamente capaces de construir viviendas. Al no poder construir casas de manera tradicional, muchas familias recurren a la construcción con tierra por la abundancia del recurso y facilidad de ejecución (Ribeiro, 2015). El desarrollo de construcciones con tierra ha incluido técnicas como tapial, quincha, adobe y lo más innovador, Bloques de Tierra Comprimida (BTC) (Jquin, 2012). El interés por mejorar el comportamiento mecánico y la durabilidad de la tierra, y en efecto de estas unidades de albañilería, ha llevado al estudio de mejoras de procesos de fabricación y técnicas estabilización (Venkatarama, 2012). A pesar de estos cambios, a nivel estructural la resistencia mecánica de las construcciones de tierra en países con actividad sísmica no es suficiente, siendo necesaria la instalación de un sistema de reforzamiento estructural que aporte estabilidad, resistencia y rigidez durante eventos sísmicos (Blondet, García, Brzev, & Rubiños, 2011; Yacila & Salsavilca, 2019).

La presente tesis busca aportar con el desarrollo de sistemas constructivos alternativos en países sísmicos, como la albañilería con bloques estabilizados de tierra comprimida (BTC-E) a través de la propuesta metodológica para la caracterización mecánica de sistemas de reforzamiento. Inició con la revisión bibliográfica sobre el uso y la influencia del reforzamiento estructural en construcciones con BTC. Así, se pudo establecer un procedimiento para la producción de morteros estabilizados compatibles con los muros de BTC-E y, un procedimiento para la evaluación de su durabilidad a la erosión por agua. Además, se propuso la producción de una matriz compuesta por mortero y refuerzo superficial (geomalla) para su aplicación como sistema de reforzamiento estructural, por tal razón, se debe determinar las propiedades mecánicas que influyen en el comportamiento estructural de estas construcciones. Finalmente, se validó el procedimiento de producción de morteros a partir de la ejecución de una campaña experimental, incluye la caracterización del material y la evaluación de su resistencia al agua.

1.2. Motivación

Los terremotos han demostrado que las viviendas hechas de tierra son vulnerables ante sismos, poniendo en gran riesgo la vida de millones de personas que las habitan. Acorde al Censo Nacional de la INEI (2017), aproximadamente el 27.9 % de la población habita en construcciones de tierra, siendo la mayoría poblaciones de las zonas rurales. Las albañilerías con BTC ensamblables es una alternativa con mejores características mecánicas en comparación a las viviendas tradicionales de tierra como el adobe, quincha o tapial. Las cualidades provienen de la homogeneidad, la facilidad de fabricación y el control de la calidad de la producción de BTC. Así como de la posibilidad del uso de estabilizantes, permitiendo incrementar su resistencia de compresión y durabilidad, convirtiéndolo en un material industrializable (Cid, 2012; Guerrero, Roux, & Soria, 2010). Sin embargo, es importante identificar las limitaciones que el sistema de albañilería con BTC, como la fragilidad sísmica en zonas propensas a este tipo de movimientos (Holliday, Ramseyer, Reyes, & Butko, 2016). La aplicación de un sistema de reforzamiento superficial en zonas altamente sísmicas es necesaria para mejorar el comportamiento estructural de estas construcciones. Según lo mencionado por Solís, Torrealva, Santillán, & Montoya (2015), la técnica de reforzamiento con geomalla es la que mejor se adapta para construcciones de tierra, los modelos desarrollados y los resultados obtenidos incentivan a profundizar en el aporte que brindan. La implementación de un sistema de reforzamiento estructural basado en el uso de geomallas para las construcciones con bloques estabilizados de tierra comprimida (BTC-E), es importante porque podrían contribuir al desarrollo de sistemas compatibles y con resistencias y ductilidades mejoradas.

El reforzamiento que se desea implementar en estos sistemas constructivos alternativos para países sísmicos, se da a partir de una propuesta metodológica. Incluye establecer un procedimiento para la producción de mortero estabilizado compatible con los muros de BTC-E, y proponer la producción de una matriz compuesta por mortero y geomalla para su aplicación como refuerzo estructural superficial. La primera parte de la metodología, corresponde al análisis de la materia prima, y al desarrollo de morteros estabilizados a partir de la caracterización física – mecánica y la evaluación de resistencia al agua, validados por la ejecución de una campaña experimental.

1.3. Antecedentes

Alrededor del mundo, más de un tercio de la humanidad habita en viviendas construidas con tierra, esto representa cerca del 51% de la población en países en desarrollo

(Houben & Guillaud, 1994). Las técnicas más comunes de construcción con tierra son el tapial, quincha, bajareque y bloques de adobe (Astorga, 2011; Jaquin, 2012). Tanto la accesibilidad al material como la facilidad de producción y de autoconstrucción, hace que este tipo de edificaciones sean más atractivas para la población, lo que genera construcciones deficientes a nivel estructural (Blondet, García, et al., 2011). Por otro lado, la fabricación de bloques de tierra comprimida (BTC) es una de las tecnologías más innovadoras en la industria de la construcción con tierra. Los BTCs se introducen en el sector como una alternativa económica y sostenible, pero presentan ventajas sobre los materiales de tierra tradicionales, manteniendo las características de facilidad de fabricación y confort e incrementando su resistencia mecánica (Juárez, Caballero, & Morales, 2010). Estas ventajas generan que las viviendas edificadas con BTC presenten mayor resistencia mecánica, gracias al proceso de fabricación industrializado por medio de la compactación con prensas mecánicas o hidráulicas (Adam & Agib, 2001). Una de las técnicas más conocidas para mejorar las propiedades mecánicas de este material es la adición de estabilizantes químicos. Las viviendas construidas con bloques estabilizados de tierra comprimida (BTC-E) pueden llegar a resistir fuerzas dinámica de hasta 0.3g, lo que equivale a un sismo de 6.5 de magnitud en la escala de Richter (Sturm, Ramos, & Lourenço, 2015). A pesar de la ventaja que representan, las construcciones con BTC-E no son sísmicamente suficiente para resistir fuerzas de gran magnitud en países altamente sísmicos, la estructura se somete a grandes tensiones internas y deformaciones pudiendo colapsar. Por ello, surge la necesidad de mejorar la resistencia dinámica de las construcciones alternativas de tierra, por ejemplo, a base de BTC-E. La implementación de un sistema de reforzamiento estructural puede evitar la destrucción de estas construcciones frente a los terremotos.

Los sistemas de reforzamiento más conocido son FRP (Fiber-Reinforced Polymer) y FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix), ambos compuestos por fibra, tela o malla polimérica embebida en la matriz adhesiva (Cárdenas & Luna, 2017). La principal diferencia entre estos dos sistemas se encuentra en el tipo de material adhesivo, es decir, el utilizado para adherir el refuerzo a la superficie del muro. Los FRP se componen de una resina polimérica, mientras que, los FRCM podrían emplear como matriz aglutinante morteros de tierra (Carozzi & Poggi, 2015). El tipo de reforzamiento ideal para la construcción con tierra es el FRCM, al ser un material poroso como el suelo, puede absorber y emitir humedad regulando el equilibrio higroscópico. (Gomes, Faria, & Gonçalves, 2017).

Ciertas organizaciones relacionadas a la industria de la construcción han desarrollado guías y códigos de diseño para los sistemas de reforzamiento, donde se establecen ensayos

que evalúan las propiedades mecánicas del mortero y del conjunto mortero – refuerzo, denominado matriz. Tal es el caso de la guía AC 434 (2011) y RILEM Technical Committee 232-TDT (2016), que presentan bases para el diseño de la matriz estructural, y consideraciones respecto al mortero y refuerzo a emplear. En los últimos años se han realizado diversos estudios que permiten conocer el comportamiento de la matriz, a través de ensayos de tracción y de adherencia (Carozzi et al., 2020; Carozzi, Milani, & Poggi, 2014; De Felice et al., 2014; Ghiassi, Oliveira, Marques, Soares, & Malijaee, 2016). Otras investigaciones sugieren caracterizar el comportamiento de la matriz cuando es aplicada a un sistema de albañilería, mediante ensayos de compresión diagonal o corte cíclico (Garcia-Ramonda, Pelá, Roca, & Camata, 2020; Miccoli, Müller, & Fontana, 2014; Ribeiro, 2015; Salsavilca, Yacila, Tarque, & Camata, 2020). Las conclusiones conseguidas señalan que, cada ensayo brinda parámetros importantes para la caracterización mecánica de la matriz de forma independiente que luego se complementan entre sí. Asimismo, deja en cuestionamiento cual es el procedimiento más adecuado para caracterización mecánica de la matriz.

1.4. Objetivos

El objetivo general de la investigación es aportar con el desarrollo de sistemas constructivos alternativos para países sísmicos a partir de la propuesta metodológica para la caracterización mecánica del sistema de reforzamiento de construcciones con bloques estabilizados de tierra comprimida (BTC-E).

Objetivos específicos:

- OE1. Revisar la bibliografía sobre el uso y la influencia del reforzamiento estructural en construcciones con tierra: BTCs simples y estabilizados.
- OE2. Establecer un procedimiento para la producción de morteros estabilizados compatibles con los muros de BTC-E.
- OE3. Proponer la producción de una matriz compuesta por el mortero estabilizado y la geomalla para su aplicación como refuerzo estructural superficial.
- OE4. Validar el procedimiento de producción de morteros estabilizados con cemento y cal a partir de la ejecución de una campaña experimental que incluye la caracterización del material y evaluación de durabilidad a la erosión por agua.

1.5. Organización

El Capítulo 1 contiene una breve introducción del tema de investigación, también desarrolla la justificación, antecedentes, objetivos y organización del presente estudio.

El Capítulo 2 contiene el estado del arte en base a revisión bibliográfica sobre BTC y la matriz de reforzamiento sísmico. Se inicia identificando la aplicación del BTC en la construcción, recopilación de la normativa nacional e internacional existente, estabilización química y ensayos de caracterización mecánica. Luego, se detalla sobre la importancia del mortero para la matriz, recolección de normativas existentes para la caracterización, estabilización y el proceso de fabricación del mortero. También, se presentan los tipos de refuerzos sísmicos y la caracterización mecánica y, se enfatiza en la aplicación de la geomalla como refuerzo superficial.

El Capítulo 3 presenta la metodología para la evaluación de la durabilidad y caracterización mecánica del reforzamiento estructural para sistemas de albañilería de BTC-E. Se presenta un flujograma de la metodología conformada por cuatro etapas y se desarrolla cada una de ellas.

El Capítulo 4 lleva a cabo la campaña experimental para la validación del procedimiento de desarrollo de morteros estabilizados para el reforzamiento estructural de los sistemas de BTC-E. A partir de la metodología propuesta, se expone la caracterización del suelo base, se explica sobre el proceso de producción y estabilización química y, la caracterización física y mecánica del mortero. Tras obtener los morteros estabilizados con cemento y cal, se evalúa su durabilidad a la erosión por agua mediante ensayos de permeabilidad, absorción y erosión a fin de obtener un mortero óptimo.

El Capítulo 5 muestra las conclusiones de la tesis y trabajo futuro de la investigación.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Bloques de tierra comprimida (BTC)

Desde inicios del siglo XVIII los BTC han sido utilizado como material de construcción. El suelo utilizado para la fabricación de estos ha involucrado diversos estudios que constituyen el mejoramiento del suelo a través de la estabilización, por ejemplo, mejorando sus propiedades de resistencia mecánica y durabilidad. La unidad de albañilería de BTC es fabricada en moldes que dan forma y uniformidad al material, la técnica no requiere el empleo de mano de obra calificada. No obstante, existen múltiples normativas alrededor del mundo que presentan desde los requisitos necesarios para considerar al suelo como material de construcción hasta el proceso de fabricación de BTC y construcción de viviendas. Por otro lado, el uso de BTC se considera eco sostenible, pues permite reducir la energía y la emisión de CO₂ en comparación con otros materiales de construcción.

2.1.1 Aplicación del BTC en la construcción

Las construcciones de tierra alrededor del mundo, conforman cerca del 50% de la población de los países en desarrollo y al menos el 20% de la población urbana habitan en viviendas construidas con tierra (Houben & Guillaud, 1994).



Figura 2.1: Construcciones con tierra a nivel mundial (De Sensi, 2003)

Las tecnologías aplicadas antiguamente se siguen llevando a cabo; de este modo, construcciones como el tapial, quincha, bloques de adobe construidos con madera, caña o fibras vegetales y recientemente los BTC, no han perdido vigencia (Astorga, 2011; Jaquin, 2012). Acorde al Censo Nacional de la INEI (2017), aproximadamente el 27.9 % de la población habita en construcciones de tierra siendo la mayoría el sector rural, las viviendas construidas son principalmente de adobe o tapia. Esto demuestra una alta demanda de las

construcciones de tierra por ser un material asequible, económico y de simple proceso constructivo. Sin embargo, muchas veces se construyen sin la supervisión de un especialista pudiendo presentar deficiencias en el comportamiento estructural frente un evento sísmico (Blondet, García, et al., 2011).

Por otro lado, los BTC están teniendo un mayor impacto como técnica de construcción al surgir como evolución del adobe, la diferencia está en proceso de fabricación que ahora es mediante una prensa mecánica pudiendo ser manuales o motorizadas (Adam & Agib, 2001). La prensa manual mecánica es ligera, cuenta con un módulo de moldeo y ejercer bajas presiones, además es de bajo costo y fácil de usar para la fabricación y reparación. Por otro lado, la prensa hidráulica motorizada puede producir presiones mayores a 2 MPa, debido al funcionamiento del pistón y sus sistemas hidráulicos de diseño compacto, también se puede acoplar una tolva para la mezcla de materiales. La Figura 2.2 muestra el diseño que poseen estas máquinas.

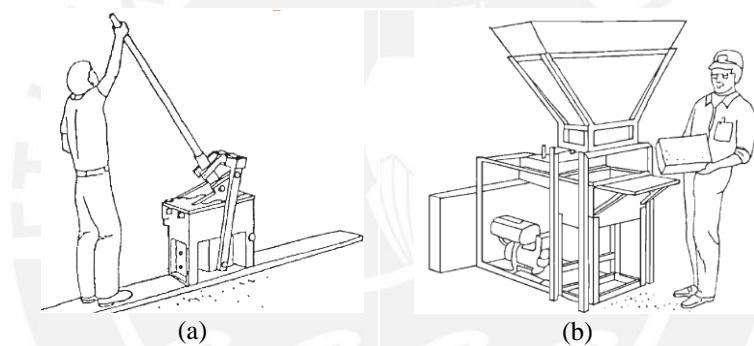


Figura 2.2: Prensas para la producción de BTC: a) Manual mecánica e b) Hidráulica motorizada (Adam & Agib, 2001)

El proyecto HiloTec y la empresa Mota Engil en Malawi – África, desarrollaron un manual de construcción donde se detalla el proceso constructivo de una vivienda de BTC. En primer lugar, se selecciona un lugar conveniente para la construcción que cuente con un suelo adecuado para la fabricación de BTC. Por lo que, se debe realizar una serie de pruebas al suelo como el Análisis granulométrico y los Límites de Attemberg, a través de pruebas empíricas como el “rollito” y la “bolita”. Después de los ensayos, se inicia con la fabricación de los BTC, la Figura 2.3 detalla como es el proceso de fabricación de las unidades.

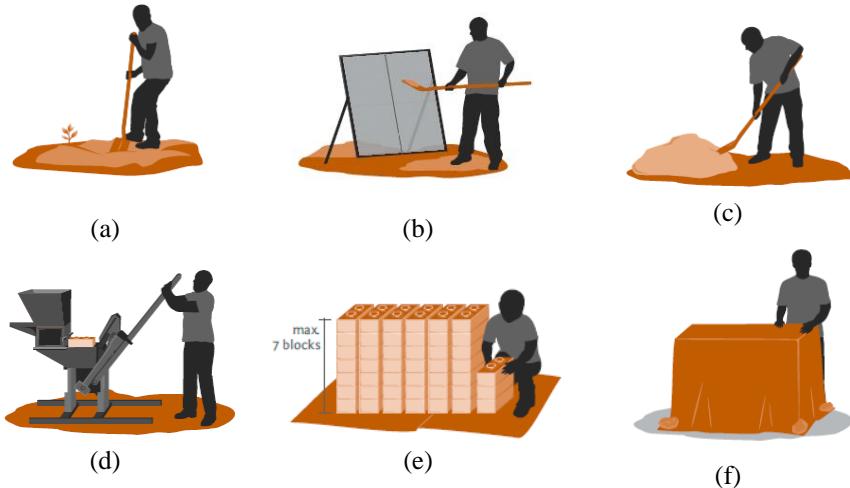


Figura 2.3: Proceso de fabricación de BTC: a) preparación de la tierra, b) tamizado por la malla #4, c) estabilización del suelo con cemento, d) colocación del material en la máquina, e) almacenamiento de los BTC-E y f) curado hermético (Ramos et al., 2014)

Por último, se realiza la nivelación, compactación y construcción de la cimentación, la primera hilada debe ser colocada lo más exacta posible para que los bloques superiores tengan un correcto asentamiento y se eviten grietas.

2.1.2 Normativa existente sobre la construcción con BTC

La selección adecuada del suelo como material de construcción, geometría y procedimientos de ensayos para la construcción de sistemas de albañilería con BTC debe cumplir ciertos requisitos, los cuales se encuentran estipulados en las normas nacionales y documentos normativos vigentes.

Las investigaciones realizadas por Alvarez (2018); Guerrero, Roux, & Soria (2010); Nagaraj, Sravan, Arun, & Jagadish (2014) mencionan algunos parámetros que el suelo base debe cumplir y el posterior mejoramiento, en caso lo requiera. Entre estos se encuentra: límites de plasticidad, pues influye en la trabajabilidad del suelo para la fabricación de los BTCS; la granulometría, para conocer el contenido de arcilla y arena fina, además de evitar la bolonería (Alvarez, 2018; Cid, 2012). Así también, la Norma UNE 41410 (2008) recomienda que la curva granulométrica y la plasticidad del suelo se encuentre dentro de los límites mostrados en la Figura 2.4a y Figura 2.4b respectivamente. También, se menciona que el contenido de arcillas debe ser menor al 10% y se debe evitar material orgánico en los suelos.

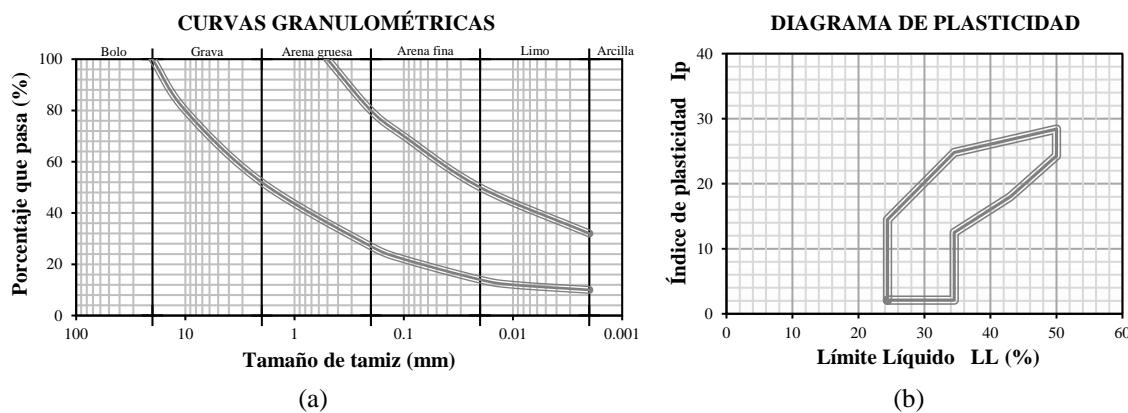


Figura 2.4: a) Zona ideal de suelo para la construcción y b) zona recomendada para la plasticidad de suelos (UNE 41410, 2008)

La Tabla 2.1 proporciona una visión general de las normas de construcción de tierra y los documentos normativos existentes, los cuales respaldan los ensayos realizados por diversos investigadores. Estos son referencia para la selección del suelo, el material estabilizante, la geometría y los ensayos de caracterización física del suelo para la fabricación de los BTCS.

Tabla 2.1: Documentos normativos existentes

País	Norma	Selección suelos	Material	Geometría (mm)	Ensayos
África	ARS 681 (1996)	Suelos arcillosos sin material orgánico o sales solubles. Granulometría y plasticidad según límites.	BTC-E – Cemento y Cal	Bloques de 295x90-95x140.	<ul style="list-style-type: none"> • LL, LP, IP • AGR (Análisis Granulométrico) • LL, LP, IP • Prueba de consistencia
Brasil	NBR 8491 (2012)	Suelos arcillosos sin material orgánico.	BTCE - Cemento	Bloques de 200x95x50/230 x110x50 con un rebaje de 13 a 25 de cada borde.	<ul style="list-style-type: none"> • Contenido de humedad. • AGR
	NBR 8492 (2012)	AGR:			
	NBR 10833 (2013)	<ul style="list-style-type: none"> • #4 = 100% • #200= 10-50% • LL ≤ 45% • IP ≤ 18% 			
España	UNE 41410 (2008)	Rechaza suelo orgánico o con sales solubles. AGR y plasticidad de acuerdo con los límites (ver Figura 2.4)	BTCE - Cemento, cal o yeso	Bloques macizos, con rebaje entero, medio y $\frac{3}{4}$, y bloque Mattone.	<ul style="list-style-type: none"> • AGR • LL, LP, IP. • Ensayo de erosión. • Ensayo de humectación/secado. • Resistencia a compresión (f'_c).
India	IS 1725 (1982)	Suelo con un contenido de arcilla entre 10-15% y de arena, mayor a 65%. IP ≤ 12%.	BTCE - Cemento, cal o puzolana	Bloques de 190x90x90 190x90x40 290x190x90	<ul style="list-style-type: none"> • f'_c en seco. • Ensayo de compactación de Proctor.
	IS 13827 (1993)				
Nueva Zelanda	NZS 4298 (2020)	Rechaza materia orgánica, suelos con sales solubles y bolonería.	BTCE - Cemento o cal	Bloques de 290x140x90. Lisos y con rebaje.	<ul style="list-style-type: none"> • Ratio f'_c húmedo/seco. • Prueba de erosión.

La investigación de Alvarez (2018) define una geometría de BTC que se presenta en la Figura 2.5a para la construcción de sistemas de albañilería de junta seca en países sísmicos. El sistema que estudia se basa en la interconexión sin mortero mediante endentaciones de 10 mm ubicados en la parte superior e inferior de BTC-E (ver Figura 2.5b).

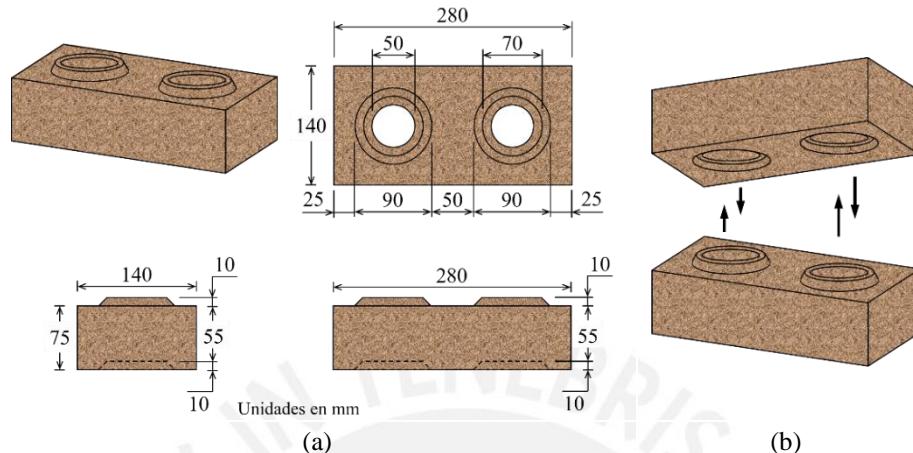


Figura 2.5: a) Geometría del BTC-E e b) interconexión de junta seca mediante edentaciones

Adicionalmente, las investigaciones proponen ensayos de caracterización física y química para asegurar la trabajabilidad del suelo y durabilidad de los BTCs como se presenta en la Tabla 2.2. La caracterización química considera realizar un conteo del contenido de orgánico y el análisis XFR, mientras las demás constituyen parte de la caracterización física.

Tabla 2.2: Investigaciones sobre la caracterización física y química de los BTC

Ensayos de caracterización física	Investigaciones
Análisis XFR	Alvarez (2018)
ASTM D5381-93 (2021)	
Contenido de humedad	Adam & Agib (2001); Alvarez (2018); Cid (2012)
ASTM D2216 (2019)	
Contenido orgánico	Cid (2012); Esteve (2016); Venkatarama Reddy & Prasanna (2010)
ASTM D2974 (2014)	
Distribución granulométrica (por tamizado)	Adam & Agib (2001); Alvarez (2018); Guerrero et al., (2010); Venkatarama & Prasanna (2010)
ASTM D422-63 (2007)	
Límites de Atterberg	Alvarez (2018); Nagaraj et al. (2014); Neves & Faria, (2011)
ASTM D4318 (2017)	

Algunos autores indican que es necesario conocer la composición mineralógica a través de los ensayos XRD (X-Ray Diffraction) para diferenciar los tipos de arcilla presentes. Así, se evitan arcillas expansivas que provocarían el hinchamiento excesivo del suelo durante la hidratación, las cuales afectan la resistencia, densidad y porosidad de los BTCs, indicadores de durabilidad (Kinuthia, 2015). Por este motivo, Cid (2012) y Patil & Attar (2015)

recomienda un suelo formado por arcillas tipo caolinita o illita debido a la baja expansión que tienen como se muestra en la Figura 2.6.

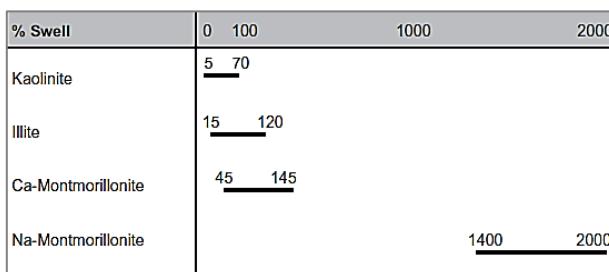


Figura 2.6: Capacidad de los suelos arcillosos (Kinuthia, 2015)

Respecto al proceso de estabilización, Hall, Najim, & Keikhaei Dehdezi (2012) indican que se clasifica en física cuando se realiza un mejoramiento del suelo base y química, cuando se modifica la estructura granular de la tierra. De esta manera, se distinguen dos tipos de construcción con tierra normalizados, los BTCs no estabilizados y estabilizados. Los BTC no estabilizados, ganan resistencia por los minerales arcillosos que actúan como aglutinantes naturales, mientras los BTC estabilizados (BTC-E) por el tipo de conglomerante añadido (Neves & Faria, 2011).

2.1.3 Estabilización química del BTC

El suelo natural tiene ciertas características como resistencia, plasticidad, retracción, etc., las cuales son controladas por la distribución granulométrica, el tipo y la cantidad de arcillas presente. Con el fin de mejorar estas características y satisfacer los requisitos específicos de las construcciones ingenieriles se altera el suelo añadiendo algún conglomerante (Hall et al., 2012), surgiendo la técnica de estabilización que contrarresta las deficiencias de las construcciones de tierra.

Patil & Attar (2015) señalan que, la estabilización tiene tres principales objetivos: reducir la porosidad, aumentar la densidad y cohesión del suelo húmedo, y mejorar el comportamiento mecánico. Por lo que, se debe procurar una adecuada homogenización entre el suelo y el estabilizante para reducir los efectos erosivos por intemperismo, variaciones de temperatura, humedad y agua de lluvia (Adam & Agib, 2001; Burroughs, 2001; Venkatarama & Prasanna, 2010). La composición adecuada del suelo, la humedad óptima, y la correcta selección del estabilizante, son relevantes porque definen la cohesión suelo – estabilizante (Bland, 2011). Hall et al. (2012) indica que, los criterios de selección del estabilizante se basa en ciertas características del suelo como el índice de plasticidad y porcentaje de material cohesivo, de acuerdo a lo mencionado presenta la Figura 2.7.

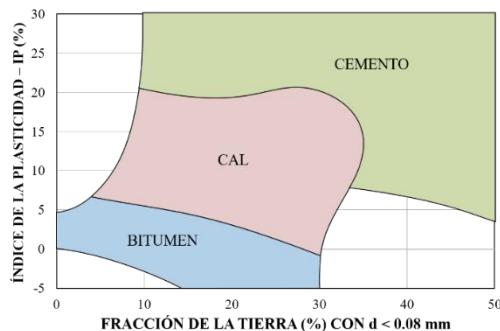


Figura 2.7: Criterio de selección de los estabilizantes según las características del suelo (Hall et al., 2012)

Burroughs (2001) considera que la elección del estabilizante se basa en una adecuada distribución granulométrica, es decir, el estabilizante completaría la fracción granular faltante del suelo. En la Tabla 2.3Tabla 2.3 se detalla los estabilizantes sugeridos para cada tipo de suelo.

Tabla 2.3: Estabilizante sugerido según el tipo del suelo (adaptado de Burroughs, 2001)

Tipo de suelo	Estabilizante recomendado
Arenas muy finas, arenas limosas y finas, arenas finas arcillosas, limos arcillosos, limos	El estabilizador más apropiado es el cemento. También es adecuada la emulsión asfáltica.
Arcilla grava, arcilla arenosa, arcilla limosa	La adición de cal y arena es beneficiosa.
Grava limosa, arena-limo-grava	Cemento.

a) Estabilización con cemento

Los suelos compuestos de grano grueso, arcillas no expansivas y alto contenido de pH, son ideales para estabilizarlos con cemento al mejorar la resistencia a compresión y la durabilidad (Venkatarama, 2012). Esto debido a que, la resistencia mecánica del cemento tiende a incrementar en el tiempo por la hidratación del mismo gracias al curado (Venkatarama & Prasanna, 2010). La Figura 2.8 esquematiza la variación de la resistencia a compresión según la fracción de arcilla presente en el suelo. Los resultados muestran que el contenido óptimo de arcilla varía entre 10 – 15% para los suelos limosos y arenosos con el fin de ser utilizados como material de construcción.

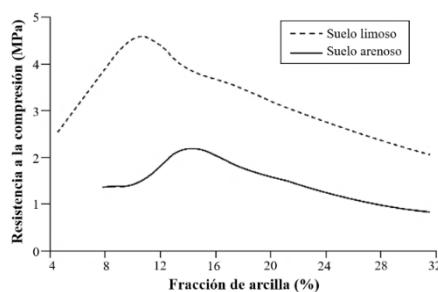


Figura 2.8: Resistencia a compresión según el contenido de arcilla (Venkatarama Reddy, 2012)

Gupta & Venkatarama (2005); Nagaraj et al. (2014); Raheem, Bello, Makinde, & Tech (2010) demostraron que, la resistencia a compresión incrementa conforme aumenta el porcentaje de cemento en la mezcla. En la Figura 2.9 se observa que el aumento del porcentaje de cemento (respecto al peso del suelo) es proporcional a la resistencia para la estabilización BTCs.

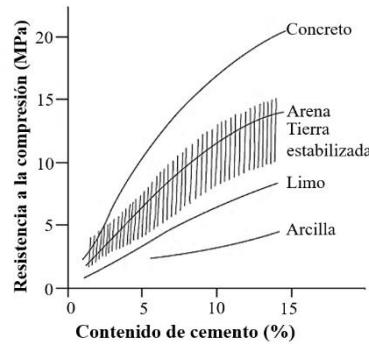


Figura 2.9: Resistencia a la compresión respecto al contenido de cemento (Houben & Guillaud, 1994)

b) Estabilización con cal

La estabilización con cal para suelos arcillosos y con alto contenido de pH, es generalmente utilizada porque controla la expansión y contracción de los BTCs (Hall et al., 2012). El proceso de reacción entre la cal y el suelo genera una reacción puzolánica, formando un gel cementoso insoluble que contribuye a incrementar la resistencia a compresión de los BTC-E.

La estabilización con cal reduce la plasticidad mejorando la trabajabilidad y el grado de absorción de agua, siendo el suelo menos sensible a los cambios de humedad, reduciendo agrietamiento durante el secado (Adam & Agib, 2001). Según Venkatarama Reddy (2012), la cantidad de cal agregada para incrementar la resistencia a compresión de los BTC-E, depende la cantidad de arcilla presente en el suelo. La Figura 2.10 esquematiza esta relación, se observar que el porcentaje de cal varía entre 5 – 15%. Asimismo, el contenido óptimo se encuentra alrededor de 5 – 12% para suelos compuesto por arcilla caolinita y montmorillonita, respectivamente.

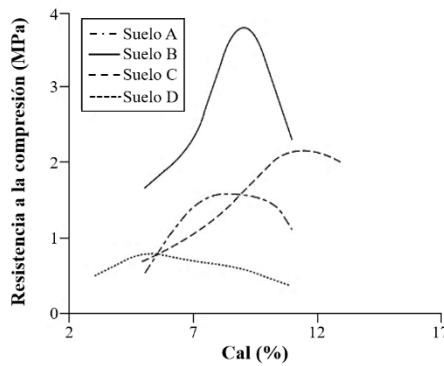


Figura 2.10: Resistencia a la compresión en base a la cantidad de cal a 28 días (Venkatarama, 2012)

Tabla 2.4: Tipo de arcilla y contenido óptimo para cada suelo (adaptado de Venkatarama, 2012)

Suelo	Tipo de arcilla	Contenido de arcilla (%)
Suelo A	Montmorillonita	11.5
Suelo B	Caolinita	10.5
Suelo C	Caolinita y montmorillonita	6.0
Suelo D	Caolinita	5.0

2.1.4 Ensayos de caracterización mecánica

La caracterización mecánica de las unidades de BTC y BTC-E permite identificar el comportamiento mecánico de estos según del tipo de suelo, cantidad de estabilizante y la presión de compactación durante la fabricación (Uzoegbo, 2016). Asimismo, es importante determinar las propiedades mecánicas de la albañilería, con el fin de identificar el comportamiento del sistema ante fuerzas de compresión, flexión, corte y la energía de fractura.

a) Ensayos mecánicos de las unidades de BTC y BTC-E

Identificar la resistencia a compresión de las unidades de BTC es un parámetro importante, pues brinda una idea de la capacidad de resistencia y calidad de la unidad como del sistema de albañilería de BTC (Holliday et al., 2016). Por consiguiente, se busca incrementarla a través de una mezcla adecuada de tierra y estabilizante, compactación y curado adecuado durante la fabricación (Riza, Rahman, Mujahid, & Zaidi, 2010). El estudio desarrollado por Udawattha, De Silva, Galkanda, & Halwatura (2018) relacionado a los BTC-E en base a diversos polímeros naturales, concluye que un suelo compuesto por partículas pequeñas permite tener mayor resistencia a la compresión debido al incremento del área superficial. Asimismo, tener una alta resistencia a compresión garantiza que la resistencia a flexión sea mayor. Existe numerosas investigaciones con relación a las propiedades

mecánicas de las unidades de BTC y BTC-E. La Tabla 2.5 presenta algunas de estas propiedades mecánicas como la resistencia compresión y flexión, y el módulo de elasticidad de las unidades de BTC y BTC-E realizadas por distintas investigaciones en los últimos años. Se observa que el cemento proporciona una mejor resistencia con respecto a los otros estabilizantes en medida que se encuentre una mayor cantidad en la mezcla.

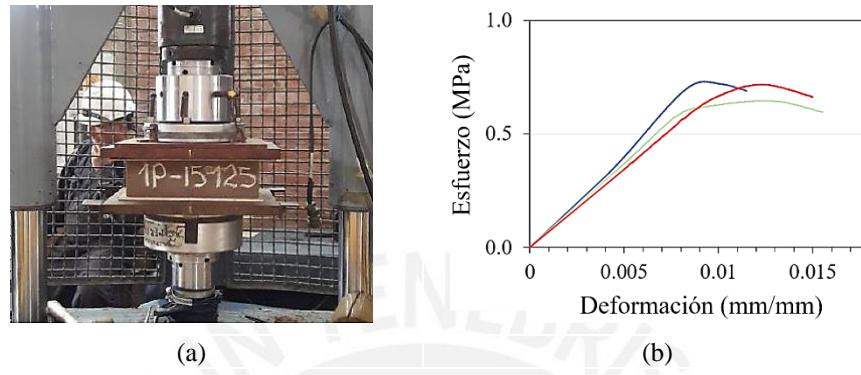


Figura 2.11: El ensayo de compresión uniaxial: a) Configuración y b) resultados (Alvarez, 2018)

Tabla 2.5: Propiedades mecánicas de los BTC y BTC-E

Investigación	Material	Espécimen (mm)	Esfuerzo Compresión*	Esfuerzo Flexión	Módulo de ruptura	Curado (días)
			(MPa)	(MPa)	(MPa)	
Alvarez (2018)	BTC		0.89 - 1.22	0.12	45.29	7 - 28
	BTC-E (8% cemento)	280 x 140 x 75	2.28 - 3.64	0.77	304.5	7 - 28
	BTC-E (15% puzolana)		1.12 - 2.38	0.2	82.01	7 - 28
Izemmouren, Guettala, & Guettala (2015)	BTC-E (0 - 30% puzolana y 10% cal)	200 x 100 x 100	10 - 16			28
Ribeiro (2015)	BTC-E (10% cemento y 5% cal)	280 x 140 x 95		3.3	161	28
Uzoegbo (2016)	BTC-E (8% cemento)	203 x 102 x 57	4.0			28

*Condición: estado natural.

Asimismo, las normas mencionadas en la Tabla 2.6 son respaldadas por diversas investigaciones, donde se especifican valores mínimos de resistencia a compresión y módulos de rotura para que los BTC sean considerados unidad de albañilería.

Tabla 2.6: Resistencia a la compresión mínima requerida (adaptado de Alvarez, 2018)

Norma	Año	Esfuerzo (MPa)	Tiempo de curado
NZS 4298	2020	2.2	28 días
HB 195	2002	1.0 – 25.0	No especifica
UNE 41410	2008	1.3; 3.0; 5.0	No especifica

Tabla 2.7: Módulo de ruptura mínima según normativa (Alvarez, 2018)

Norma	Año	Módulo de ruptura (MPa)
NZS 4298	2020	0.3
HB 195	2008	0.1 - 4.0

b) Ensayos mecánicos del sistema de albañilería de BTC

La Norma NTE E.070 (2006) define como sistema de mampostería o albañilería a una estructura compuesta por unidades de albañilería asentadas con mortero, o por unidades de albañilería apiladas (Albañilería de Junta Seca) al carecer de mortero en las juntas. Este último, se denomina sistema de machihembrado porque consiste en integrar los bloques a través de las endentaciones. El proceso de construcción de estos sistemas de albañilería se realiza por hiladas de unidades y medias de BTC-E. Se recomienda dar ligeros golpes a los bloques con un martillo de goma para ajustar el ensamblaje y para la alineación de las hiladas se utiliza un nivel. En la Figura 2.12 se presenta el patrón de distribución de los BTC-E para pilas, muretes y muros. Los muros son de doble hilada para evitar fallas fuera del plano por una baja esbeltez (Sturm et al., 2015), donde cada hilada tiene un patrón de distribución de BTC-E para asegurar la correcta interconexión entre una fila y la otra. Asimismo, en cada fila se alterna la colocación perpendicular de un BTC-E y cada quinta fila estos son colocados de forma perpendicular como se muestra en la Figura 2.12c.

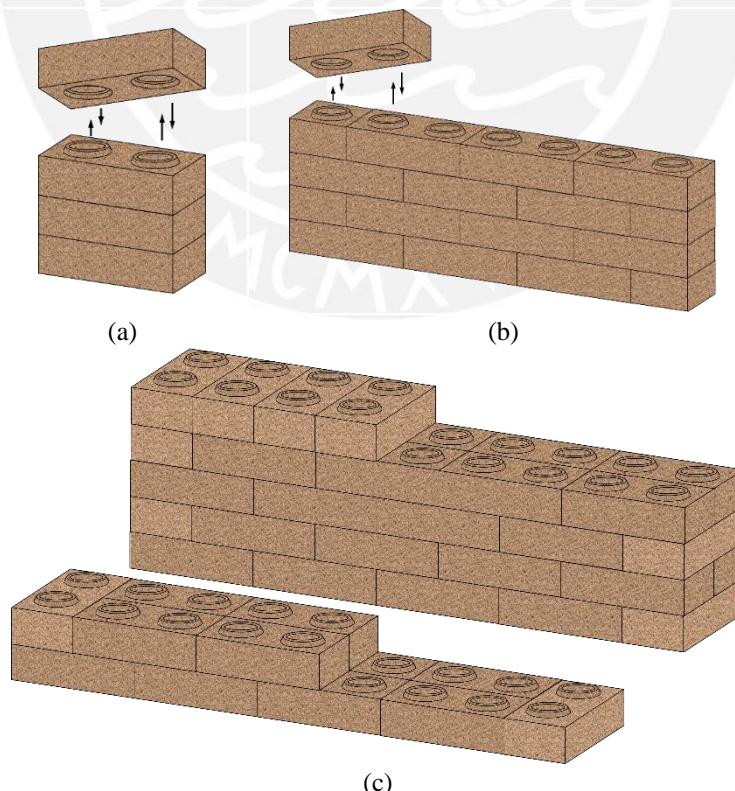


Figura 2.12: Sistema de albañilería de BTC-E: a) pilas, b) muretes y c) muros

Diversas investigaciones han contribuido al estudio del comportamiento de este tipo de sistema de albañilería, permitiendo conocer y evaluar las deficiencias estructurales que podría presentar ante un evento sísmico. La Tabla 2.8 muestra los resultados de la resistencia compresión y el módulo de elasticidad, llevados a cabo por diversas investigaciones en pilas y muretes de Bloques estabilizados de tierra comprimida interconectados (BTCl-E).

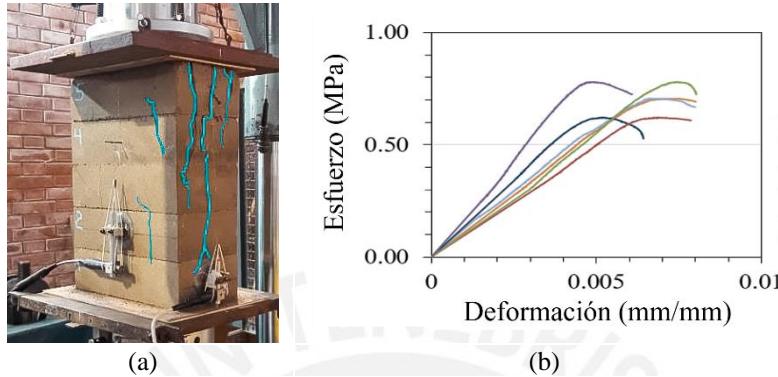


Figura 2.13: Ensayo de compresión uniaxial en primas: a) Configuración y b) resultados (Alvarez, 2018)

Tabla 2.8: Propiedades mecánicas de la albañilería de los BTCl y BTCl-E

Investigación	Geometría	Espécimen (cm)	Material	Esfuerzo Compresión (MPa)	Módulo de ruptura (MPa)	Curado (días)
Alvarez, (2018)	Pilas de BTCl-E	37.5 x 28 x 14	BTCl	0.4	51.2	
			BTCl-E (8% cemento)	1.44	294.5	56
			BTCl-E (15% puzolana)	0.75	120.8	
Ribeiro (2015)	Muretes de BTCl-E**	70 x 70 x 14	BTCl-E (10% cemento y 5% cal)	6.32	7.1	N.E
Silva et al., (2015)	Pilas de BTCl-E	25 x 28 x 10	BTCl-E (10% ceniza volante)	3.3	551.0	180
Sturm et al., (2015)	Pilas de BTCl-E	47 x 28 x 14	BTCl-E (5% cemento y 10% calín)	0.87	129.0	N.E
	Muretes de BTCl-E	84 x 84 x 14		0.53	102.0	

** Compresión diagonal

Las fallas en la estructura debido a cargas de corte en el plano son muy comunes, por esa razón, se han llevado a cabo diferentes ensayos que evalúan el rendimiento de corte de la albañilería de BTCl y BTCl-E para determinar sus propiedades mecánicas. El rendimiento de corte se determina a través del análisis de la capacidad de conexión entre bloques bajo el criterio de fricción de Coulomb. La Norma UNE EN 1052-3 (2003) indica que una evaluación mediante pruebas de triplete, como se muestra en la Figura 2.14a, permite obtener la tangente del ángulo de fricción y la resistencia al corte inicial. Sturm et al. (2015) evaluaron el comportamiento al corte de pilas de BTCl-E. Los resultados mostrados en la

Figura 2.14b, indican que la resistencia al corte inicial y de adherencia bajo carga en el plano y fuera es aportado por la conexión entre las hendiduras. Al producirse las fallas en las conexiones de enclavamiento se puede afirmar la efectividad de adherencia, lo cual sugiere que este tipo de conexión sería adecuado en regiones sísmicas (Alvarez, 2018).

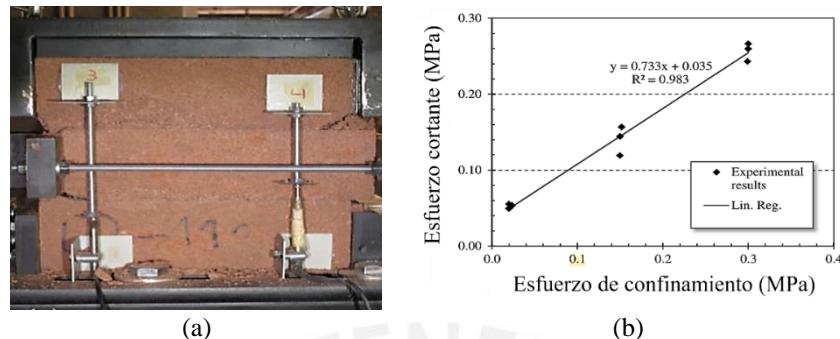


Figura 2.14: Ensayo de corte en pilas: a) Configuración y b) curva de esfuerzo cortante - esfuerzo normal (Sturm et al, 2015)

Sturm et al. (2015) estudio el comportamiento de muros de BTC sometidos a cargas cíclicas estáticas, se construyeron dos muros con dimensiones de 2.1 x 1.9 x 0.28 m (longitud x altura x profundidad). Así, se obtuvo una resistencia a la carga lateral media de 11.3 kN mientras que, el desplazamiento lateral máximo promedio fue 22.5 mm. Las fallas que se presentaron fueron en forma de grietas diagonales a lo largo del muro y algunos bloques se rompieron por la mitad. En cambio, los muros de albañilería de BTCI han manifestado un comportamiento dúctil y una gran capacidad de dissipación de energía histérica estable. Qu et al. (2015) estudiaron la influencia del comportamiento estructural de los muros por la relación que existe entre la altura – ancho de los muros, y la presencia de un techo y una brida al final de este (ver Figura 2.15a). Los muros ensayados a carga cíclica evidenciaron un comportamiento dúctil (Figura 2.15b), no obstante, durante el ensayo se pudo evidenciar que cuando se reduce la relación de altura-ancho, la resistencia de carga lateral también se reduce. Por el contrario, si los muros poseen una brida que se encuentra bajo cargas de tracción, se aumenta la resistencia lateral. También, se identificó que la presencia de una ventana se reduce la resistencia a la carga lateral, puesto que, los esfuerzos se concentran en las esquinas de la abertura, aunque esta estructuración no impacta en la ductilidad de la pared.

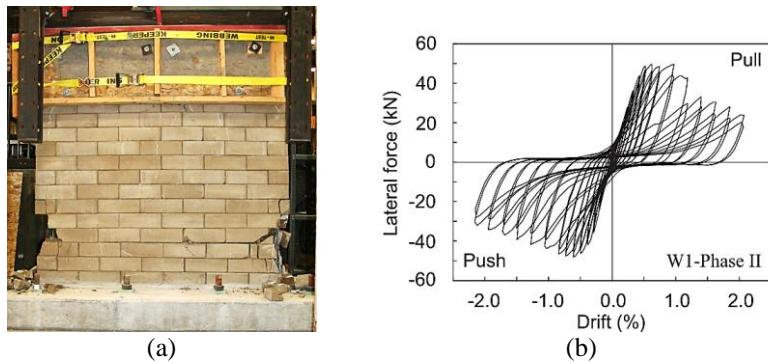


Figura 2.15: Ensayo de corte cíclico en muros: a) Fallas y b) curvas fuerza lateral – deformación (Qu et al., 2015)

2.1.5 Acción sísmica en construcciones con BTC

Los terremotos provocan fuerzas horizontales y verticales de gran magnitud sobre las estructuras, ocasionando tensiones y deformaciones por fuerzas paralelas o perpendiculares a los muros. Por un lado, las cargas dentro del plano actúan como fuerzas paralelas al sistema integrado, siendo presentados los modos de falla que se producen en la Figura 2.16. El primer tipo de falla es por corte debido a fuerzas de tracción diagonal, se puede evitar colocando un mortero que permita la adherencia entre las unidades de albañilería. El segundo tipo de falla es por cizallamiento o deslizamiento cuando las conexiones entre muros continuos son resistentes o por juntas pobres. El tercero es por flexión, las grietas suelen aparecer de forma vertical u horizontal en la parte inferior del muro. Otro tipo de falla es por volcamiento, cuando la conexión muro - suelo no es adecuado (Yacila & Salsavilca, 2019). Por otro lado, se encuentran las cargas fuera del plano que actúan como fuerzas perpendiculares al sistema de albañilería, la carga genera una falla por tensión de flexión. Entre los modos de falla característicos se encuentra la aparición de grietas de corte en las esquinas de los muros, en muros largo puede llegar a derrumbarlos como resultado de mala conexión con los muros adyacentes, este tipo de falla puede generar el colapso de toda la estructura (Yacila & Salsavilca, 2019).

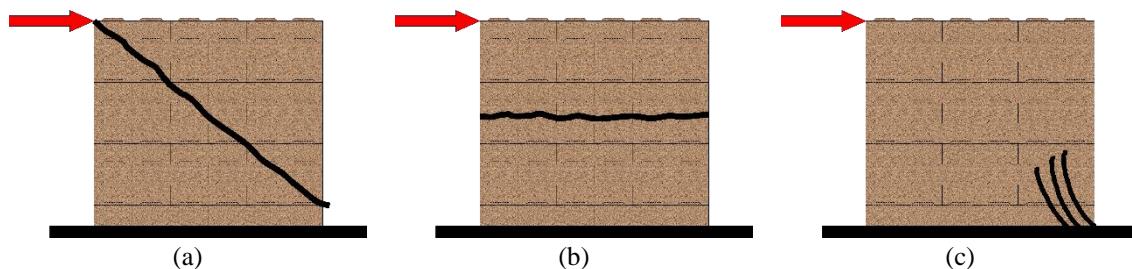
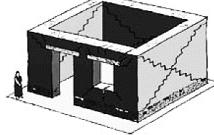
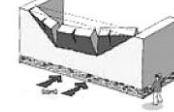
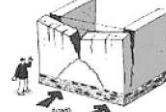
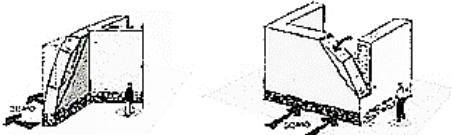
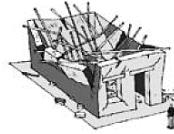


Figura 2.16: Típicas fallas por cargas horizontales dentro del plano: a) por corte, b) deslizamiento y c) flexión

Las fuerzas más alarmantes para las construcciones de tierra son aquellas que pueden causar tracción, corte y flexión fuera del plano, pues al ser sistemas de baja resistencia

mecánica, la acción sísmica hace que sean vulnerables (Ribeiro, 2015). Se entiende por vulnerabilidad como el daño posible de una estructura por las propias características de construcción (Muñoz, 2011). Las viviendas de tierra suelen ser asociadas a problemas de humedad por filtraciones, fragilidad de los materiales o uso de materiales no compatibles. A nivel estructural, a la distribución inadecuada de los muros en planta, mala conexión de los muros, pérdida de revestimiento, ausencia de diafragmas y estructuración deficiente de cubierta (Lacouture, Bernal, Reyes, & Ruiz, 2007). Ante estas deficiencias, los sistemas de albañilería de tierra presentan ciertos mecanismos de colapso y patrones de agrietamiento, como se detalla en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Mecanismo de falla en construcciones de tierra por acciones símicas (adaptado de Lacouture et al., 2007)

Mecanismo de falla	Esquema
Falla por corte en el plano del muro, se asocia a las fuerzas horizontales. Se puede amplificar por entrepisos o techos muy pesados y aberturas (ventanas, puertas, etc).	
Falla por flexión fuera del plano forma agrietamiento horizontal en la base y centro del muro, generando grietas diagonales y fisuración en la parte superior.	
Falla por flexión fuera del plano del muro, desarrollando grietas verticales en la parte central. Esto genera la formación de grietas diagonales y, el posterior, desprendimiento de la pared por la fisuración superior de las paredes adyacentes.	
Falla por flexión fuera del plano en el encuentro de dos muros cuando no están confinados.	
Colapso de la cubierta por la mala colocación del techo sobre los muros generando una falla en el área superior de los muros.	

2.2 Matriz de reforzamiento sísmico

Algunos sistemas de albañilería en países sísmicos no son capaces de resistir cargas laterales inducidas por un terremoto, tendiendo a fallar frágilmente. Ante esto, se plantea la posibilidad de colocar un tipo de reforzamiento sísmico, compuesto de un mortero y una malla de reforzamiento, que permita mejorar el comportamiento estructural mediante el aumento de la capacidad de carga contra la acción de empuje y retraso del colapso (Astorga, 2011; Neves & Faria, 2011; Solís et al., 2015; Yacila & Salsavilca, 2019). De esta manera, el sistema de reforzamiento sísmico que se propone está compuesto por un mortero y refuerzo

denominándose al conjunto matriz. Para Blondet et al. (2011), un refuerzo puede presentar buena capacidad de deformación pero si no cuenta con un recubrimiento, la durabilidad puede verse afectada reduciendo la resistencia mecánica. Se han estudiado varias soluciones de reforzamiento para las construcciones de tierra desde los refuerzos con fibras hasta el uso de las mallas geosintéticas, plásticas y metálicas. Sin embargo, colocar un refuerzo no sería suficiente si este no cuenta con un recubrimiento, pues así las estructuras presentarían un mejor comportamiento estructural. De esta manera, se aumenta la resistencia inicial al corte y la rigidez de las paredes, el confinamiento adecuado por parte del mortero al refuerzo permitiendo dotar de mayor resistencia a las paredes ante cargas sísmicas (San Bartolomé & Quiun, 2015).

2.2.1 Importancia del mortero para la matriz

El uso del suelo como mortero de recubrimiento no solo está vinculado a las consideraciones estéticas. Una de las características más importantes de una vivienda es la comodidad, la cual depende de diferentes factores como la humedad, temperatura, radiación, etc. El desequilibrio de humedad dentro de las viviendas impacta de manera negativa en la salud de los habitantes. Los estudios de Grandjean (1972) y Becker (1986) mostraron que las exposiciones a humedades inferiores a las regulares por largos periodo de tiempo, aumentan las posibilidades de resfriados y enfermedades similares (como se citó en Minke, 2006). En este sentido, la tierra desempeña un papel importante al ser considerado un controlador de humedad por presentar inercia higroscópica. Esto se explica como la capacidad que tienen los materiales porosos, como el suelo, para absorber y emitir humedad regulando el equilibrio de la humedad relativa interior (HR), siendo la eficacia limitada por la velocidad de absorción (Delinière, Aubert, Rojat, & Gasc-Barbier, 2014; Minke, 2006). No obstante, si no se encuentran estabilizados son vulnerables a las condiciones externas como la lluvia siendo erosionables (Minke, 2006; Santos, Faria, & Silva, 2019).

Gomes, Faria, & Gonçalves Diaz (2017) señalan que, estabilizadores químicos como la cal o el cemento mejoran las propiedades de resistencia y durabilidad de los elementos de tierra si están correctamente hidratadas, pues permite la formación de CSH (silicato cálcico hidratado) reduciendo el grado de la absorción de agua (Malisa, Park, & Lee, 2014). Principalmente, se destaca el efecto de la cal como estabilizador al prevenir desgastes por acción del agua incrementando la durabilidad (Guettala, Houari, Mezghiche, & Chebili, 2002). Asimismo, la adición de este en los morteros de tierra permite mejorar el confort de

las viviendas debido a la baja conductividad térmica, la absorción acústica en comparación con el concreto tradicional y la resistencia al fuego. Sin embargo, por la baja resistencia mecánica por fuerzas de compresión y flexión logradas con las mezclas de cal, su uso no es tan recomendado para la construcción de elementos estructurales (Arizzi, Brümmer, Martín-Sánchez, Cultrone, & Viles, 2015).

2.2.2 Normativa existente para la caracterización, estabilización y fabricación de morteros

La selección adecuada del suelo como material de construcción, la caracterización física y mecánica, la estabilización y los procedimientos para la fabricación de un mortero de revestimiento, se encuentran estipulados en las normas nacionales y documentos normativos alrededor del mundo. El desarrollo de un estándar para la caracterización del mortero premezclado como recubrimiento aparece en Europa, desde agosto del 2013 con la Norma DIN 18947 (2018). Esta normativa se encuentra ligada a la Norma española UNE EN 1015, en todas sus series, pero se han realizado algunas variaciones según la finalidad del mortero (Delinière et al., 2014). Esta norma contiene especificaciones sobre la caracterización física y mecánica para los morteros; sin embargo, no especifica sobre la estabilización química. Por otro lado, desde un tiempo atrás, África cuenta con ciertos estándares para morteros de tierra que incluye la estabilización física y química en base al cemento y la cal.

La composición geológica es una de las principales variables de las propiedades suelo. Por ello, la aceptación del suelo como material de construcción involucra la determinación de las propiedades físicas, químicas y mineralógicas del suelo original para el mejoramiento y/o la estabilización (Arteaga, Medina, & Gutierrez, 2011; Ramos et al., 2014; Venkatarama & Prasanna, 2010). Investigaciones realizadas por Carvalho (2015); Oliveira et al. (2016) y Ribeiro (2015) mencionan algunas consideraciones que se debe tener en cuenta para el suelo base y el mejoramiento de este, en caso lo requiera. De acuerdo con Cid (2012), se debe realizar un tratamiento preliminar de la materia prima con el fin de mejorar las propiedades físicas del suelo. Algunas de las propiedades que se debe tener en cuenta son: la granulometría y los límites de plasticidad. Por un lado, la granulometría permite determinar el contenido de arenas y arcilla presentes en el suelo. Por otro lado, los límites de plasticidad influyen en la trabajabilidad de la mezcla para la fabricación del mortero por lo que es importante determinarlos. La Norma ARS 681 (1996) especifica que la curva granulométrica del suelo se debería encontrar dentro del huso recomendado como se muestra en la Figura

2.17. Asimismo, la Norma DIN 18947 (2018) define el límite de sales menor a 0.12%: siendo la cantidad de nitratos menor a 0.02%, sulfatos a 0.1% y cloruros a 0.08%.

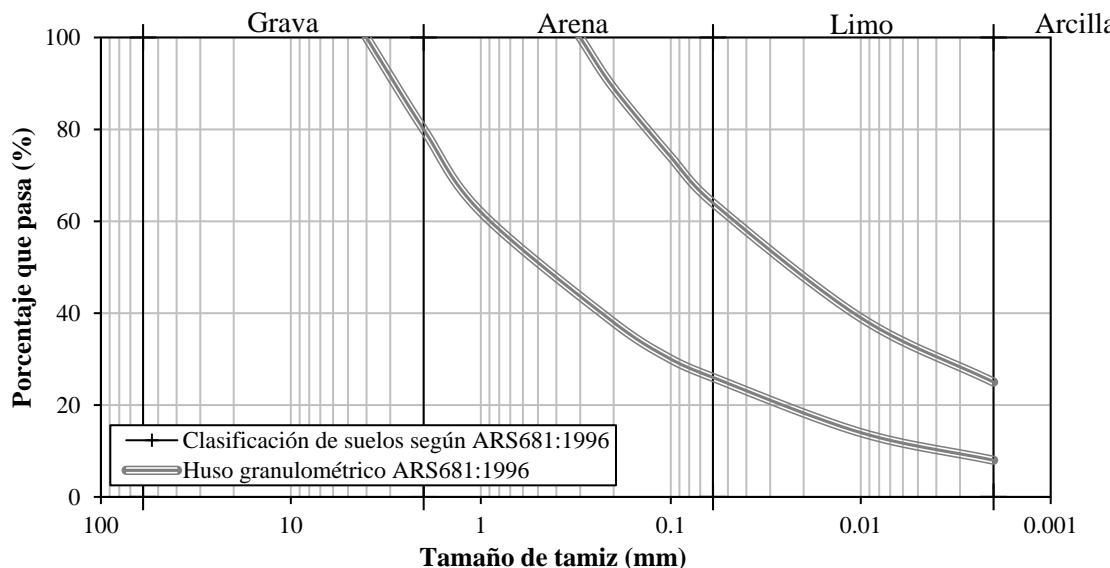


Figura 2.17: Huso granulométrico del suelo como material de construcción (ARS 681, 1996)

Además, tanto las normas en mención como los estudios realizados proponen ensayos de caracterización física y mecánica para asegurar la trabajabilidad de la mezcla de mortero y la durabilidad del mortero endurecido. Estos ensayos y las respectivas normas que los respaldan se indican en la Tabla 2.10.

Tabla 2.10: Investigaciones sobre la caracterización física y mecánica del mortero

Ensayos de caracterización	Investigaciones
Contenido en aire en el mortero fresco UNE EN 1015-7 (1999)	Faria et al. (2016)
Consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas) UNE EN 1015-3 (2000)	Delinière et al. (2014); Faria et al. (2016); Gomes et al. (2012); Olivito et al. (2014); Ribeiro (2015)
Densidad aparente del mortero fresco UNE EN 1015-6 (1999)	Delinière et al. (2014); Gomes et al. (2012); Olivito et al. (2014); Ribeiro (2015)
Distribución granulométrica (por tamizado) UNE EN 1015-1 (1999)	Carvalho (2015); Delinière et al. (2014); Faria, Santos, & Aubert (2016); Gomes et al. (2017); Olivito et al. (2014); Ribeiro (2015)
Resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido UNE EN 1015-11 (2020)	Carozzi & Poggi (2015); Carvalho (2015); Dalalbashi, Ghiassi, & Oliveira (2019); Delinière et al. (2014); Olivito et al. (2014); Ribeiro (2015)
Resistencia a tracción indirecta de probetas UNE EN 12390-6 (2010)	Carozzi & Poggi (2015)

2.2.3 Estudio de durabilidad del mortero

La durabilidad está definida como la resistencia de un material para conservarse inalterable en el tiempo frente a las condiciones físicas, químicas y biológicas, entre las cuales se destaca las acciones ante agentes externos, desgastes, heladas, abrasión, insectos, plantas, etc. (Morel, Bui, & Hamard, 2012). La durabilidad está relacionada con la porosidad de los materiales siendo los de alta microporosidad menos duraderos por la capacidad de absorción de agua que poseen (Hall et al., 2012). Morel et al. (2012) indican que, las partículas de arcilla y silicio son de naturaleza hidrofílicas, por este razón la pérdida de la funcionalidad de las construcciones de tierra se debe, principalmente, al ataque del agua de lluvia (Cid, 2012; Morel et al., 2012). Cuando los poros de tierra absorben gran cantidad de agua debilitan la unión mecánica que existe entre las partículas de arcilla y los demás materiales (arena, grava, etc.), lo que conlleva a una reducción de la cohesión por ende a la de resistencia mecánica. Asimismo, la energía cinética con que las gotas de lluvias caen sobre las superficies de tierra genera una abrasión superficial, siendo más profunda cuando la fuerza de golpe sea más intensa, y el ángulo de caída que se forma entre la lluvia y la superficie sea igual a 26.6°(Morel et al., 2012). Heathcote (1991) señala que, las lluvias fuertes pero cortas no son tan agresivas como las que se dan por un mayor periodo de tiempo, pues al ser mayor el tiempo de exposición aumenta la cantidad de agua penetrada al material, lo que reduce la fuerza de enlace entre las partículas. En este sentido, para evaluar la durabilidad, diversos investigadores han propuesto ensayos que permiten simular los efectos a largo plazo de erosión causados por la humedad y del agua en corto tiempo (Heathcote, 1991). Estos ensayos y las respectivas normas que los respaldan se indican en la Tabla 2.11.

Tabla 2.11: Investigaciones sobre la evaluación de la durabilidad de elementos de tierra

Ensayos de evaluación de la durabilidad	Investigaciones
Absorción de agua por capilaridad UNE EN 1015-18 (2003)	Aguilar et al. (2016); Guettala et al. (2002); Izemmouren et al. (2015); Kinuthia (2015); Nakamatsu et al. (2017)
Absorción total ASTM C67 (2020)	García-Vera & Lanzón (2018); Izemmouren et al., (2015); Lima, Faria, & Santos Silva (2020); Stazi, Nacci, Tittarelli, Pasqualini, & Munafò (2016)
Coeficiente de resistencia XP P 13-901	Guettala et al. (2002); Heathcote (1991); Izemmouren et al. (2015); Morel et al. (2012)
Erosión acelerada NZS 4298 (2020)	Heathcote (1991); Kinuthia (2015); Morel et al. (2012); Venkatarama (2012)
Erosión por goteo NZS 4298 (2020)	Aguilar et al. (2016); Heathcote (1991); Morel et al., (2012); Nakamatsu et al. (2017); Venkatarama (2012)
Humectación-secado cíclico ASTM D559 (2015)	Donrak et al. (2018); Guettala et al. (2002); Izemmouren et al. (2015); Kinuthia (2015); Venkatarama Reddy (2012)
Permeabilidad por ángulo de contacto	Aguilar et al. (2016); Nakamatsu et al. (2017); Yuan & Lee (2013)

2.2.4 Tipos de refuerzos sísmico y la caracterización mecánica

Las matrices reforzadas consisten en fibras impregnadas en morteros (matriz aglutinante) que en conjunto presentan un comportamiento adecuado para reforzar sísmicamente sistemas de albañilería. Yacila & Salsavilca (2019) menciona que, la aplicación de una matriz a los sistemas de albañilería es un método eficaz para mejorar la capacidad global cuando estas son sometidas a cargas laterales. Investigaciones previas han demostrado que los muros de albañilería mejoran significativamente la resistencia y ductilidad al ser reforzadas con un mortero cementicio. Por ejemplo, Babaeidarabad, De Caso, & Nanni (2013) estudiaron el comportamiento de nueve muros de ladrillos bajo cargas de compresión diagonal (ver Figura 2.18). La matriz reforzada fue colocada en ambas caras del muro, se identificó dos esquemas de colocación: cuando se coloca solo una o cuatro capas de refuerzo (malla de fibra de carbono). Los resultados demostraron que la colocación de esta matriz permite aumentar la capacidad de momento fuera del plano en 2.8 y 7.5 respecto a la muestra de control (sin reforzamiento) cuando se usa una o cuatro capas respectivamente. Los diagramas de momento-deflexión evidenciaron un aumento de rigidez y ductilidad de los muros, siendo a menores capas de refuerzo mejor al no estar limitada por falla de corte o flexión.

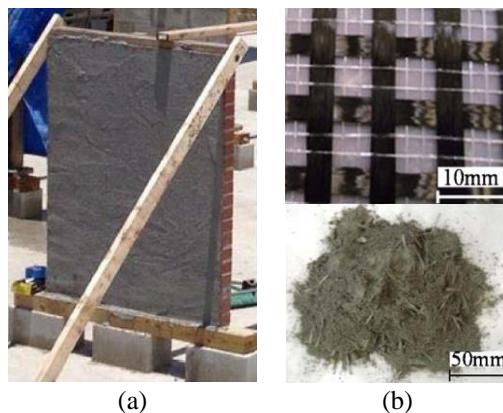


Figura 2.18: a) Muros de albañilería reforzados y b) detalle de la matriz: refuerzo de fibra de carbono y mortero cementicio (Babaeidarabad et al., 2013)

Así como se usa un mortero cementicio, el mortero de la matriz puede ser inorgánico de aglutinante natural, que además de mejorar la capacidad estructural protege al refuerzo contra los rayos UV o agentes químicos, y son considerados de poseer una mejor adherencia al sistema de albañilería (Gattesco & Boem, 2017; Ghiassi et al., 2016). Esta matriz suele ser de espesor igual a 10 mm y se compone por refuerzos unidireccional o bidireccional de fibras poliméricas, con el fin de garantizar la compatibilidad del refuerzo y el mortero (Gattesco & Boem, 2017). Entre los ensayos que determinan la compatibilidad de materiales entre la matriz y el refuerzo, así como el comportamiento mecánico del conjunto, se destacan: el ensayo de *pull-out*, tracción uniaxial y adherencia (Antunes & Masuero, 2016; Ghiassi et al., 2016). Este último ensayo, se diferencia de los demás porque permite evaluar, aparte del comportamiento de la matriz (mortero + refuerzo), la interacción entre esta y el sustrato al que es adherido (Ghiassi et al., 2016). Estos ensayos permiten caracterizar mecánicamente la matriz, permitiendo aportar procedimientos de diseños adecuados para la aplicación y operación efectiva de sistemas de reforzamiento sísmicos (Carozzi et al., 2014; Gattesco & Boem, 2017). Carozzi et al. (2020) llevaron a cabo estos ensayos, acorde a la Figura 2.19, como parte de la caracterización mecánica de la matriz (fibra de carbono + mortero polimérico) para el reforzamiento estructural. El ensayo de *pull-out* se realizó con el fin de dar a conocer directamente la interacción entre el mortero y refuerzo. El espécimen ensayado estaba compuesto por dos capas de mortero y una capa del textil incrustado, donde una parte de este se dejó libre para ser sujetado en el extremo por la máquina de prueba. En cuanto al ensayo de tracción, el espécimen de dimensiones 400 x 40 x 10 mm fue similar al anterior, en este caso el refuerzo se encontró completamente embebido. Por último, el ensayo de adherencia se realizó en muestras compuestas por un sustrato sobre el cual se coloca la matriz, con dimensiones de ancho y longitud igual a 100 mm y 260 mm respectivamente. Así

como el ensayo de pull-out, se deja una porción del refuerzo libre para ser sujetado y traccionado por la máquina de prueba, mientras se restringe el movimiento del sustrato. De estos ensayos Carozzi et al. (2020) llegaron a la conclusión que, el comportamiento de respuesta y los resultados obtenidos de los ensayo de adherencia y pull-out son similares, siempre y cuando el modo de falla sea por corte directo en la interfaz mortero-refuerzo. Del ensayo de adherencia, el modo de falla característico es por deslizamiento del refuerzo y la ruptura cerca del extremo del área adherida. La curva esfuerzo-deformación del ensayo de tracción dan a conocer que, el esfuerzo final del espécimen está liderado por el refuerzo al obtener propiedades mecánicas similares a este (rigidez del espécimen alrededor del 70% de la rigidez del textil). Asimismo, las propiedades mecánicas al inicio del ensayo son similares al del mortero (Carozzi et al., 2014; Ghiassi et al., 2016).

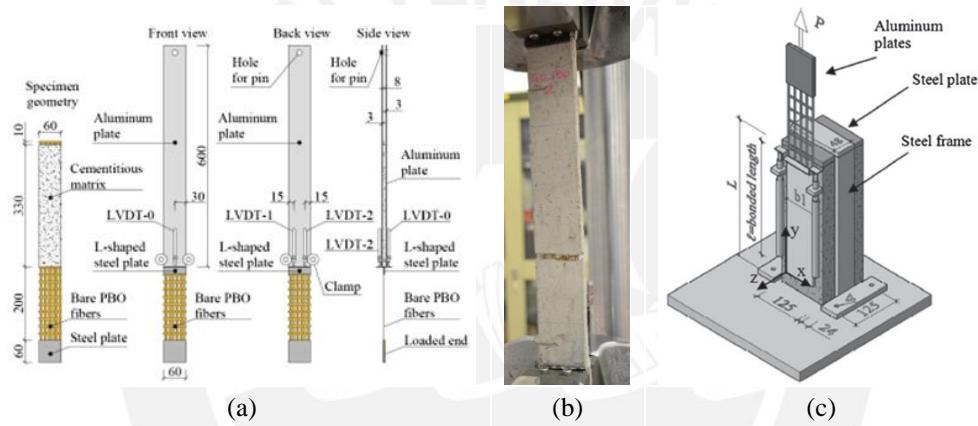


Figura 2.19: Campaña experimental de Carozzi et al. (2020): a) Ensayo de pull-out, b) de tracción uniaxial directa y c) de adherencia

El estudio realizado por Dalalbashi et al. (2019), indican la importancia de la longitud incrustada en los especímenes, específicamente para los ensayos de pull-out y adherencia, pues es la zona con mayor posibilidad de fallar por deslizamiento. De esta manera, las cargas máximas obtenidas se presentaron cuando la longitud del refuerzo incrustado fue de 150 mm, considerándose de 150 – 180 mm la longitud de enlace efectivo (Gattesco & Boem, 2017). Por otro lado, la influencia de la distancia entre fibras del refuerzo en el ensayo de pull-out, es importante porque al ser esta distancia menor, mayor será la resistencia de unión entre el mortero y el refuerzo. Ghiassi et al. (2016) y Gattesco & Boem (2017), mencionan sobre la influencia de las propiedades mecánicas del mortero y la resistencia de enlace entre la matriz – sustrato para el ensayo de adherencia.

Existen otras investigaciones que consideran realizar ensayos de compresión diagonal y corte cíclico para comprender el comportamiento de la matriz en los sistemas de albañilería (Yacila & Salsavilca, 2019). El estudio realizado por Garcia-Ramonda, Pelá, Roca, & Camata

(2020), sobre el comportamiento estructural de muros reforzados en ambas caras por un mortero a base de cal hidratada y fibras bidireccionales de basalto con barras unidireccional de acero, se presenta en la Figura 2.20. Los muros de $1270 \times 1270 \times 310 \text{ mm}^3$ ensayados por compresión diagonal mostraron que, las matrices son completamente compatibles con el sistema de albañilería, no se evidencia falla por desprendimiento antes de alcanzar la resistencia máxima. Asimismo, la colocación de estas mejoró la resistencia mecánica y la ductilidad, sin alterar la rigidez inicial, de los muros en comparación al de control (no reforzado). Por otra parte, la investigación considera que la aplicación de las matrices como sistemas de reforzamiento permite mitigar la variabilidad de las propiedades de albañilería y responder homogéneamente ante cargas externas aplicadas. Ribeiro (2015) estudió la aplicación de una matriz como reforzamiento estructural, en este caso, el refuerzo se colocó en la cara completa del sistema de albañilería recubierto con un mortero de tierra estabilizado con cemento. Se llegó a la conclusión que este sistema permite aumentar la resistencia global y el módulo de rigidez siendo 5.4 y 5.6 veces más en relación al muro no reforzado.

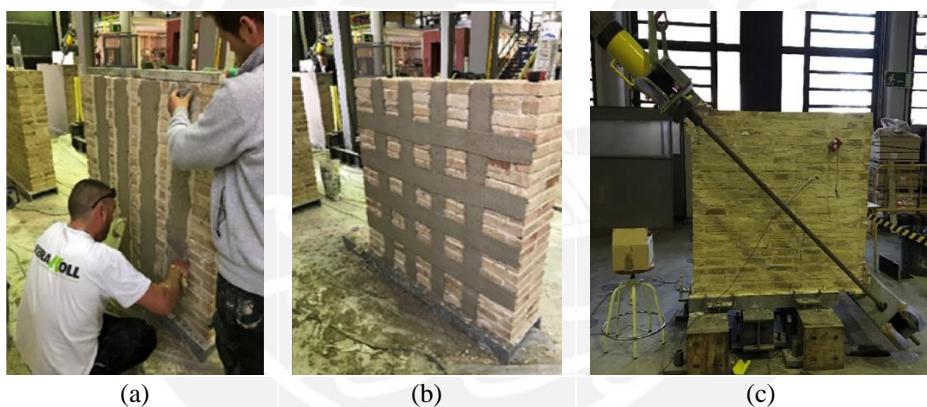


Figura 2.20: Campaña experimental de Garcia-Ramonda et al. (2020): a) muros reforzados en una dirección (vertical) y b) dos direcciones (horizontal y vertical), c) ensayo de compresión diagonal

Por otra parte, Blondet et al. (2006) estudiaron módulos de escala real a los cuales se colocaron matrices (refuerzo + mortero), ensayados en la mesa sísmica, para determinar el desempeño estructural ante cargas externas. El primer módulo fue reforzado con tiras de neumáticos distribuidas de forma verticales y horizontales, envolviendo al muro como se observa en la Figura 2.21a. El reforzamiento permitió incrementar la ductilidad de la estructura y la energía de disipación controlando el agrietamiento, extendiendo el tiempo de colapso y previniendo una falla frágil. El segundo fue reforzado con mallas plásticas al 80% como se muestra en la Figura 2.21b, demostrando eficiencia como refuerzo sísmico, no obstante, se pudo evidenciar agrietamiento significativo hasta la ruptura de algunas partes, mas no un colapso de la vivienda. Por último, el módulo reforzado con geomalla al 100% y

parcialmente (75% y 50%) de acuerdo a la Figura 2.21c, este permitió incrementar ciertas características estructurales como la resistencia, rigidez y la capacidad de deformación. Además, se observa que ante deformaciones considerables presentan cierto daño torsional, deslizamiento de la base y grietas longitudinales en el revestimiento.

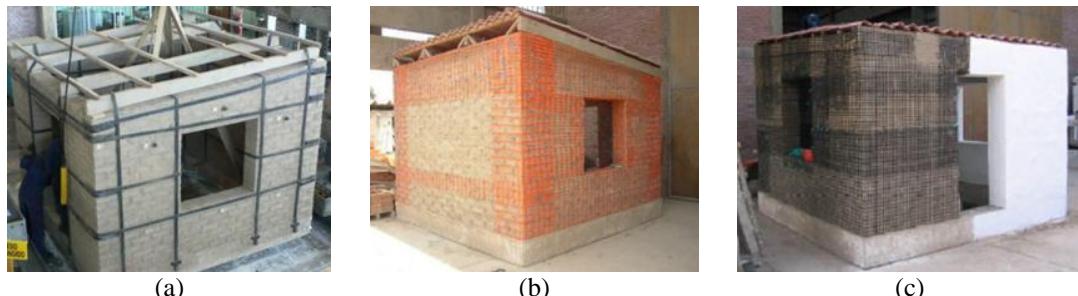


Figura 2.21: Modelo de vivienda de adobe con reforzamiento estructural: a) de tiras de neumáticos, b) de malla plástica y c) de geomalla (Torrealva, Blondet, Vargas, Tarque, & Velásquez, 2006)

2.2.5 Aplicación de la geomalla como refuerzo sísmico

Las construcciones de tierra han manifestado un buen comportamiento estructural cuando son reforzadas con geomallas, pues estas atribuyen ductilidad y resistencia a la tracción en ambas direcciones. Astorga (2011) menciona que, la colocación de geomallas ofrece una gran resistencia de deformación pues transfiere las cargas de manera adecuada. Así, durante un evento sísmico los sistemas de albañilería tienen un buen performance al no llegar al colapso. Asimismo, considera que estos deben ser recubiertos con un mortero (ver Figura 2.22a) para, además de evitar su degradación por agentes externos, aumentar la rigidez como conjunto. Los ensayos de corte cíclico de muros de adobe, de dimensiones igual a $1.80 \times 1.50 \text{ m}^3$, reforzados con geomalla biaxial y recubrimiento de mortero de tierra dan cuenta del soporte que aporta la geomalla, pues permite que no colapse la estructura de acuerdo a la Figura 2.22c. Además, el sistema de reforzamiento colocado confiere de mayor resistencia mecánica a los muros, alrededor de 65% en comparación a un muro no reforzado, a pesar de la aparición de grietas en las esquinas debido a la falla por flexión. De igual manera, Lacouture et al. (2007) llevó a cabo el ensayo de corte cíclico en muros reforzados y recubiertos. La investigación determinó incrementos en términos de resistencia y desplazamiento a medida que las cargas aumentaban, aunque también se observó desprendimiento del sistema de reforzamiento que podría generar el colapso de la estructura.

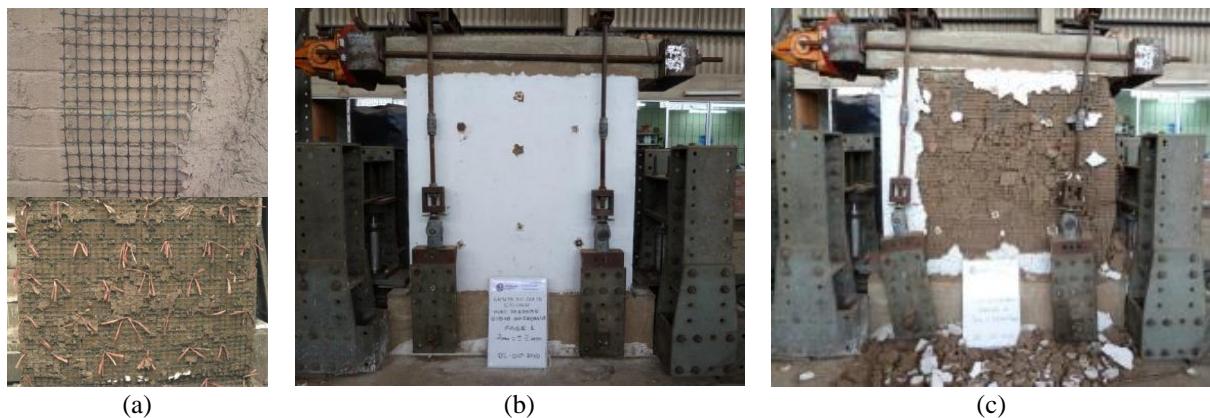


Figura 2.22: Campaña experimental de Astorga (2011): a) Detalle de la colocación de la matriz, b) antes del y b) después del ensayo de corte cíclico

La investigación de Holliday et al. (2016) consiste en el ensayo de muros doble hilada de BTC y BTC-E reforzados con geomalla y recubiertos con mortero de tierra (ver Figura 2.23a), los muros de $1.5 \times 1.5 \times 0.3 \text{ m}^3$ fueron ensayados dentro del plano. Tras el ensayo, se comprobó que la resistencia de la pared excede a la exigida por el Código Internacional de Construcción (IBC), también se observó un desprendimiento de la base del muro antes de fallar por flexión fuera del plano agrietándose por las esquinas sin colapsar. La investigación brindó regiones aceptables donde se puede desarrollar la construcción de sistemas de albañilería no reforzada, estas serían zonas de categoría sísmica D según el mapa sísmico de EE. UU con 0.2 de aceleración de respuesta espectral, perteneciente al extremo sur, norte y la costa este de EE. UU.

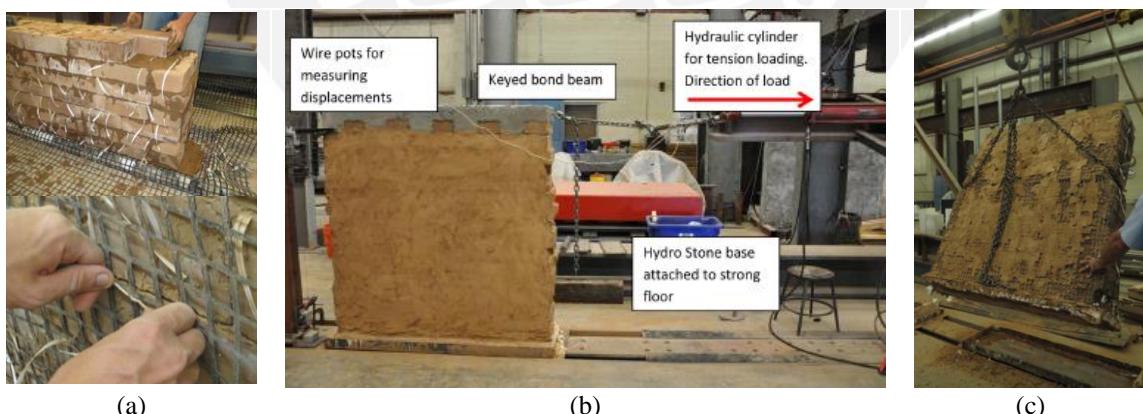


Figura 2.23: Campaña experimental de Holliday et al. (2016): a) Detalle del sistema de reforzamiento, b) configuración del ensayo y muro de BTC-E reforzado después del ensayo

Solís et al. (2015) llevó a cabo ensayo de flexión en tres puntos para muros de adobe reforzados con geomallas y recubiertos con mortero de tierra (barro), la geomalla se encuentra embebida en este y anclada al cimiento (ver Figura 2.24a). El ensayo demostró que los sistemas de albañilería de tierra son relativamente dúctiles, pese a la baja resistencia a la tracción que poseen. La aplicación de un sistema de reforzamiento es una técnica eficaz para

estas construcciones; puesto que, el ensayo demostró que los muros reforzados aumentaron en 3 y 7 veces más la resistencia a la flexión y ductilidad respectivamente, en relación a los no reforzados (ver Figura 2.24c).

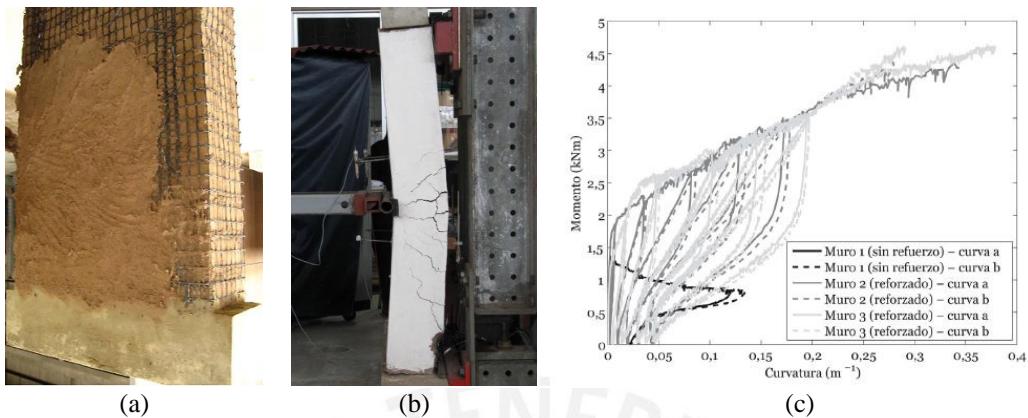


Figura 2.24: Campaña experimental de : a) Detalle del sistema de reforzamiento, b) ensayo de los muros reforzados y c) ley momento curvatura obtenida

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD Y CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL REFUERZO ESTRUCTURAL DE SISTEMAS DE ALBAÑILERÍA DE BTC-E

La metodología para la evaluación de la durabilidad y caracterización mecánica del reforzamiento estructural de sistemas de albañilería de BTC-E, busca proponer una serie de procesos que permitan desarrollar soluciones viables, eco-amigables y efectivas. Esta metodología abarca la obtención de dosificaciones óptimas de mortero, la producción de materiales optimizados y la caracterización mecánica de sistemas de albañilería reforzada. El presente capítulo tiene como finalidad describir los procesos mencionados a través de ensayos respaldados por la normativa nacional e internacional, así como por investigaciones de diversos autores.

3.1 Metodología propuesta

La metodología que se propone está conformada por 4 etapas: i) análisis de la materia prima, ii) evaluación de la durabilidad y obtención del mortero estabilizado, iii) desarrollo de la matriz para reforzamiento estructural, iv) evaluación del sistema de albañilería reforzada. Los subprocessos y el flujo de trabajo se muestran en la Figura 3.1. La primera etapa inicia con el análisis de la materia prima del sistema de reforzamiento, conformada por el refuerzo superficial y el suelo base (SB). El estudio del refuerzo superficial permite seleccionar un tipo de geomalla, resistente a la fractura y compatible con el tipo de cargas recibidas por el elemento estructural reforzado. Luego, se efectúa el ensayo de tracción directa para determinar las propiedades mecánicas de la geomalla. Por otro lado, el estudio del suelo SB incluye la caracterización físicas, químicas y mineralógicas de este, y el análisis granulométrico y mineralógico del agregado. A partir de la granulometría del suelo SB y el agregado, se decide mejorar el suelo si en caso lo requiere, de tal manera que el suelo mejorado para mortero (SMM) cumpla con los husos granulométricos de la Norma ARS 681 (1996). La segunda etapa consiste en desarrollar morteros estabilizados, a partir de la caracterización física y mecánica de dosificaciones preliminares, y la evaluación de la durabilidad de estos. La caracterización física se realiza en base a la trabajabilidad de las mezclas, mientras la caracterización mecánica en función de la resistencia mínima alcanzada por los morteros.

endurecidos. Por otra parte, la durabilidad de las muestras fabricadas con las dosificaciones preliminares se evalúa mediante ensayos de permeabilidad, absorción y erosión. De cumplir la durabilidad con los parámetros establecidos por las normativas e investigaciones, se definirá a la dosificación como óptima; caso contrario, se modificará las cantidades de agua y/o estabilizante de la dosificación preliminar del mortero. La tercera etapa desarrolla la matriz para el reforzamiento estructural, compuesta por mortero y geomalla, mediante la caracterización mecánica de la matriz y la interacción mecánica de esta aplicada al sistema de albañilería de BTC-E. La evaluación mecánica de la matriz determina su comportamiento con ensayos de tracción directa y flexión en cuatro puntos. Mientras, el estudio de la interacción mecánica entre la matriz y la albañilería de BTC-E se realiza mediante ensayo de adherencia en pilas. De esta manera, se obtiene las propiedades mecánicas correspondientes a cada ensayo, y patrones de falla de ambos estudios. La última etapa evalúa el desempeño sísmico de los sistemas de albañilería de BTC-E reforzadas frente a cargas de compresión diagonal, cíclicas horizontales y/o cargas sísmicas inducidas. Si se determina que el sistema reforzamiento mejora la capacidad sísmica de las estructuras, el sistema de reforzamiento superficial sísmico es aceptado.

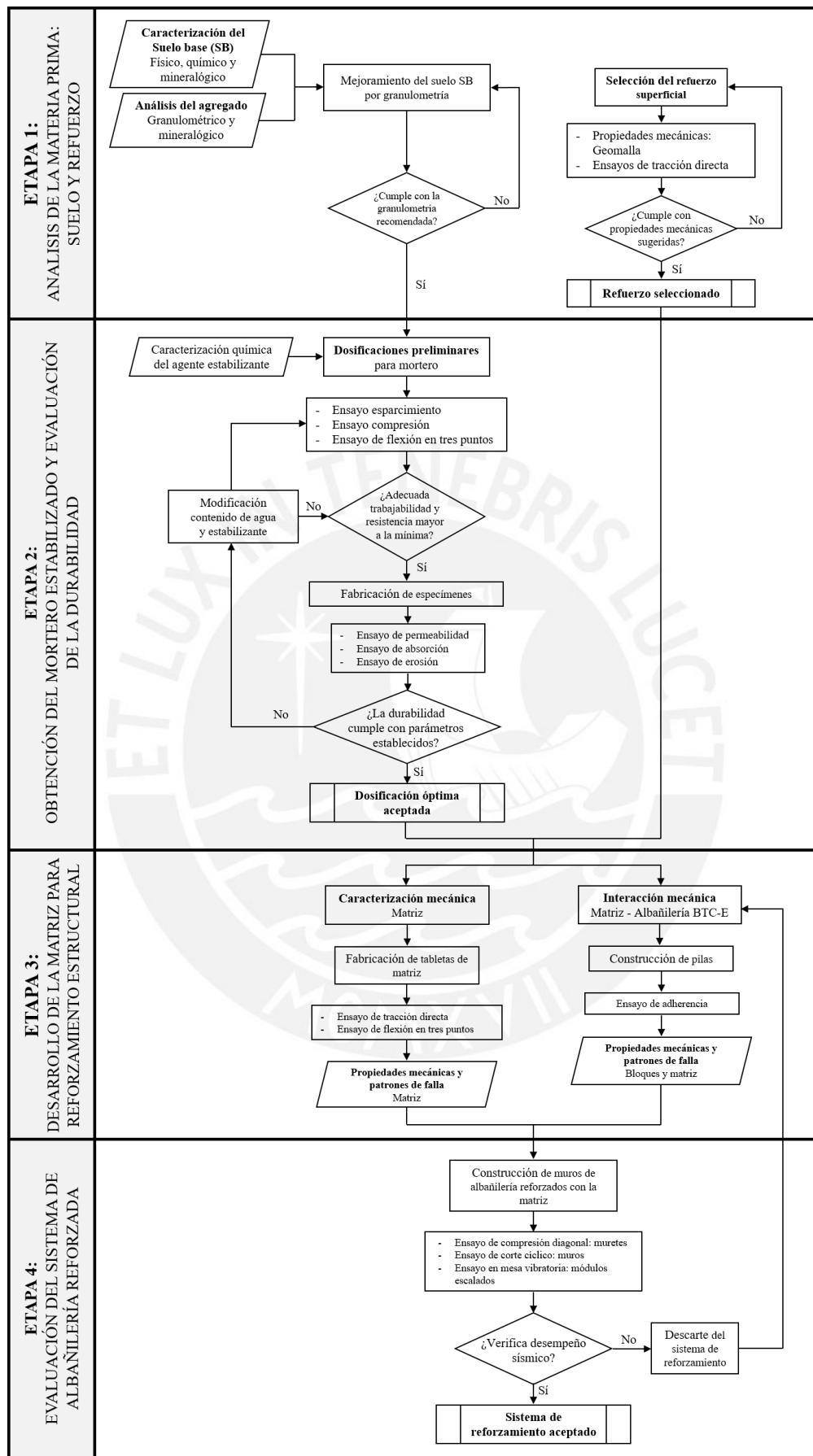


Figura 3.1: Metodología para la caracterización mecánica y evaluación de la durabilidad de matrices para el reforzamiento sísmico de sistemas de albañilería de BTC-E

3.2 Etapa 1: Análisis de la materia prima: Suelo y refuerzo

Todo material compuesto está conformado por dos fases, la fase continua (mortero) que transfiere esfuerzos y proteger a la fase dispersa (refuerzo), la cual aporta resistencia al compuesto (Callister & Rethwisch, 2012). El mortero de tierra estabilizada requiere caracterizar física, química y mineralógicamente al suelo, a partir de esto se mejora la granulometría de no cumplir con los husos sugeridos por la Norma ARS 681 (1996). Asimismo, se necesita realizar una selección de refuerzo superficial compatible y resistente.

3.2.1 Ensayos para la caracterización del suelo base (SB)

a) Ensayo de contenido de agua

Este ensayo permite identificar la humedad del suelo por masa vinculada a la cohesión, es proporcional a la resistencia mecánica que el suelo puede proporcionar (Bui, Morel, Hans, & Walker, 2014; Cid, 2012). El ensayo de contenido de agua se realiza según los lineamientos de la norma ASTM D2216 (2019). La Figura 3.2 muestra el procedimiento del ensayo.



Figura 3.2: Ensayo de contenido de humedad: a) se coloca 100 gr de suelo natural en el horno por 24 horas a 60°C, b) 24 horas después se retira y se pesa el suelo seco

La humedad se calcula como una relación entre el peso del agua (W_w) y el suelo seco (W_d), siendo W_w y W_d determinados según la ecuación (3.1) y (3.2) respectivamente.

$$W_w = W_{cap+suelo\ natural} - W_{cap+suelo\ seco} \quad (3.1)$$

$$W_d = W_{cap+suelo\ seco} - W_{cap} \quad (3.2)$$

b) Ensayo de peso específico relativo

Propiedad del suelo que indica la relación entre el peso de los sólidos y el volumen de agua que desalojan a temperatura ambiente, el ensayo de peso específico relativo de los sólidos (G_s) se ejecuta según los lineamientos de la norma ASTM D854 (2014). Inicia con el

pesado del picnómetro, luego se llena con agua destilada hasta la marca y se vuelve a pesar. En el mismo picnómetro totalmente limpio y seco, se coloca 65 gr de la muestra previamente horneada (suelo seco) y se registra la masa. Seguidamente, se llena el picnómetro con agua destilada hasta la mitad de la parte ancha con tal de cubrir la muestra y se deja reposar por 12 horas. Después de este tiempo, se retira el aire atrapado en el picnómetro (burbujas) con la bomba de vacío durante 2 horas, no se debe de olvidar agitarlo con movimientos circulares cada 30 minutos. Finalmente, el picnómetro es retirado de la bomba de vacío y llenado con agua destilada hasta la marca evitando formar burbujas, luego de 12 horas se registra la masa. No olvidar tomar la temperatura del picnómetro con el agua destilada al final del ensayo. La Figura 3.3 describe cada muestras contenidas en el picnómetro.

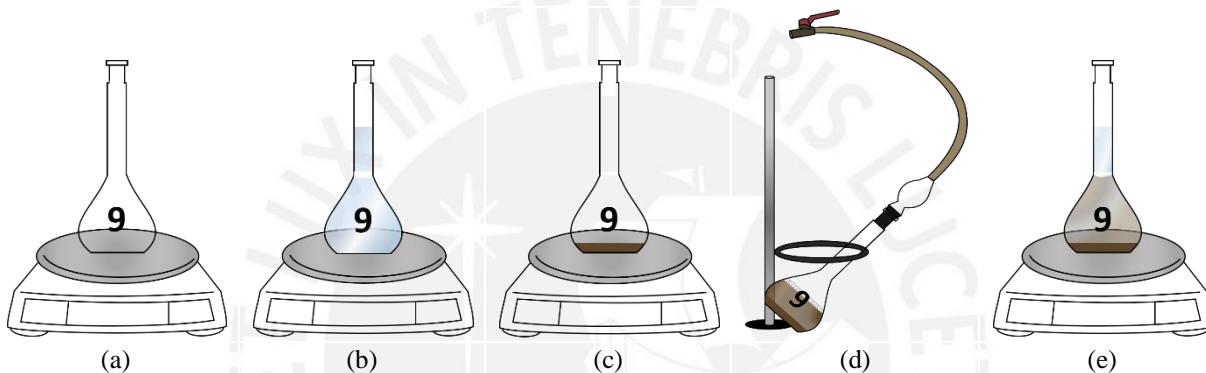


Figura 3.3: Ensayo de Gs: a) picnómetro (W_p), b) picnómetro con agua destilada (W_{w+p}), c) picnómetro y suelo seco (W_{s+p}) d) 65 gr de muestra de suelo seco y agua destilada en la bomba de vacío e) picnómetro con la muestra y agua destilada sin burbujas después de 12 horas (W_{w+s+p})

El peso específico de los sólidos (G_s) se calcula con la ecuación (3.3), donde $W_{suelo\ seco}$ y $V_{suelo\ seco}$ se determinan según la ecuación (3.4) y (3.5) respectivamente. Asimismo, se aplica un factor de corrección (α) en función a la temperatura.

$$G_s = \alpha \frac{W_{suelo\ seco}}{V_{suelo\ seco}} \quad (3.3)$$

$$W_{suelo\ seco} = W_{s+p} - W_p \quad (3.4)$$

$$V_{suelo\ seco} = W_{suelo\ seco} + W_{w+p} - W_{w+s+p} \quad (3.5)$$

c) Ensayo de análisis granulométrico

El análisis granulométrico identifica las proporciones de arcillas, limos, arenas y grava que contiene el suelo en estudio para clasificarlo como material de construcción. Diversos estudios indicaron que un suelo es considerado de esta manera si la composición granulométrica se encuentra dentro de los rangos indicados por las normas presentadas en la Tabla 3.1. Asimismo, se recomienda que la curva granulométrica este contenida dentro de los husos de la norma ARS 681 (1996), presentada en la Figura 2.17, para que dicho suelo sea

aceptado como material de construcción para la fabricación de morteros, caso contrario se necesitará realizar un mejoramiento.

Tabla 3.1: Composición granulométrica de un suelo como material de construcción

Norma	Año	Grava y Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
HB 195	2002	45-80	10-30	5-25
NBR 10833	2013	100	-	10-50
NZS 4298	2020	45-80	20-55	5-50
UNE 41410	2008	14-100	10-48	-

El ensayo se lleva a cabo de acuerdo con la norma ASTM D7928 (2017), la cual indica el procedimiento, el registro de datos y cálculos respectivos. La distribución de los tamaños se realizó a través de dos técnicas: la fracción más gruesa por tamizado del suelo en estado seco y la fracción más fina mediante el análisis hidrométrico. El ensayo inicia separando en gravas y finos con la malla #10 una muestra de suelo previamente secada en el horno. En cuanto a la técnica de tamizado, la muestra retenida en la malla #10, es decir, las gravas se colocan en un recipiente para ser lavadas con la finalidad de eliminar las partículas finas adheridas a las partículas que se está analizando y se coloca al horno por 16 horas. Después, se retira la muestra y se separa en fracciones usando las mallas: 1 ½" (37.5mm), 1" (25mm), ¾" (19mm), 3/8" (9.5mm), #4 (4.75mm) y #10 (2mm) que se observa en la Figura 3.4a, siendo cada fracción de suelo pesada. Respecto a la muestra que pasa la malla #10, se toma 115 gr y se coloca en un recipiente para lavarlo a través de la malla #200, el fin es separar las arcillas adheridas a las partículas de mayor tamaño, luego la muestra se traslada al horno para ser secado por 16 horas a $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$. Tras este tiempo, se pesa la muestra seca y se tamiza por las mallas: #10 (2mm), #20 (0.84mm), #40 (0.426mm), #60 (0.25mm), #140 (0.105mm) y #200 (0.075mm), cada fracción obtenida también es pesada. Por otro lado, la técnica del análisis hidrométrico, consiste en colocar 65 gr de la muestra pasante de la malla #10 en un recipiente con 125 mL de solución al 4% en peso de Hexametafosfato de Sodio (agente dispersante) por 16 horas. Después, el contenido del recipiente es vertido completamente en el vaso de la batidora con ayuda del agua destilada, de esta manera, las partículas de suelo no se quedan adheridas al recipiente. Tal como se muestra en Figura 3.4b, la mezcla es batida por un minuto exacto, para una adecuada dispersión de las partículas. Luego, se coloca la mezcla en el cilindro de sedimentación, a fin de no dejar ningún residuo en el vaso, se realiza un lavado con el agua destilada, la cual también se coloca en el cilindro completándose hasta los 1000 mL con agua destilada (ver Figura 3.4c). Se coloca un tapón de goma a este cilindro y se agita durante un minuto para completar la dispersión de la mezcla. Posteriormente , se

efectúa las lecturas con el hidrómetro cada cierto intervalo de tiempo (1, 2, 3, 4, 8, 15, 30, 60, 120, 240, 1440 minutos) insertándolo en la mezcla y dejándolo suspendido hasta que se estabilice, como lo muestra la Figura 3.4d. Adicionalmente, se prepara un cilindro de sedimentación con 1000 mL compuesto de agua destilada y de agente dispersante en la misma proporción utilizada anteriormente, esta servirá para leer las correcciones del hidrómetro y medir la temperatura. Después de realizar la última lectura con el hidrómetro, se transfiere la mezcla por la malla #200 para ser lavada hasta que el agua que escurra salga lo más transparente posible. Luego, se sigue el mismo procedimiento descrito para efectuar la técnica de tamizado de la porción que pasa la malla #10.

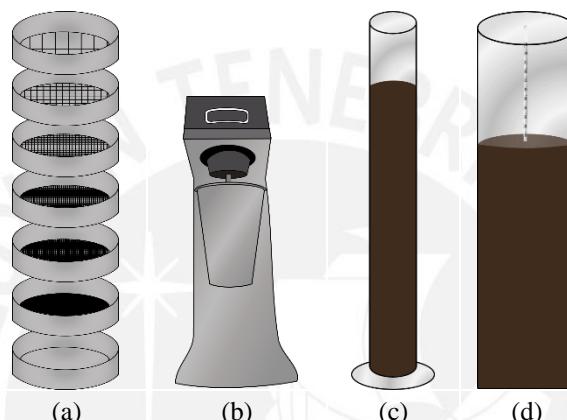


Figura 3.4: Ensayo de análisis granulométrico: a) mallas utilizadas para separar las partículas b) dispersión de los finos en la batidora c) cilindro de sedimentación con la muestra en hexametafosfato de sodio y agua destilada d) lecturas con el hidrómetro

d) Ensayo de límites de Attemberg

El ensayo se realiza con el fin de predecir el comportamiento del suelo como la permeabilidad y compactibilidad. Además, permite predecir la posibilidad de fisuración del material por contracción, pues existe una relación directamente proporcional entre el hinchamiento del suelo y índice de plasticidad (Cid, 2012). Existen normativas y diferentes estudios que indican rangos de plasticidad para que el suelo sea considerado como un material de construcción, estos se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2: Límites plasticidad del suelo como material de construcción

Autor	Año	Límite Líquido (%)	Índice de Plasticidad (%)
ARS 681	1996	25 - 35	2.5 - 15
Borroughs	2001	≤ 40	≥ 10
Cid	2012	32 - 46	16 - 28
IS 2110	1980	≤ 27	8.5 - 10.5
NBR 10833	2013	≤ 45	≤ 18

Los límites de Attemberg corresponden a los límites líquido y plástico de la fracción fina del suelo, los cuales describen dos de las cinco transiciones que poseen el suelo en términos de consistencia. Por un lado, el límite líquido representa la transición entre la consistencia plásticas y líquidas correspondiente al porcentaje de humedad que presenta el suelo. Por otro lado, el límite plástico es la porción de agua que marca la transición entre la fase semisólida y plástico, lo que se entiende como la capacidad de retención de agua (Alvarez, 2018; Burroughs, 2001). El ensayo se ejecuta siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D4318 (2017), para ello la muestra de suelo que se desea evaluar es tamizada previamente por la malla #100 y se trabaja con el material que pasa la malla. El procedimiento para el ensayo del límite líquido inicia mezclando la muestra con agua destilada hasta formar una pasta que no sea tan húmeda ni tan seca. Inmediatamente después, se coloca la pasta en la Cuchara de Casagrande y se esparce hasta cubrir toda la parte inferior de la cuchara de modo que tenga 10 mm de profundidad en el punto más profundo. Luego, se pasa el ranurador por la mitad (ver Figura 3.5a) y mediante el golpeteo continuo de la cuchara se une la muestra hasta una distancia de 13 mm (ver Figura 3.5b), se registra el número de golpes. Luego, se toma aproximadamente 20 mm de ancho de la muestra que se encuentra en la cuchara para ser secada por 24 horas en el horno y posteriormente determinar la humedad. El ensayo se repite tantas veces hasta obtener al menos 6 puntos que estén ubicados en los rangos: 25 a 35 golpes, 20 a 30 golpes y 15 a 25 golpes. En cuanto al ensayo del límite plástico, la muestra a analizar es mezclada con agua destilada hasta formar una pasta adecuada. Se selecciona una porción de esta, alrededor de 1.5 gramos, para amasarla y formar rollitos de 3.2 mm de diámetro como se observa en la Figura 3.5c. En caso el rollito no se fisure al llegar a ese diámetro o si transcurren más de 2 minutos, se repite el procedimiento. Caso contrario, de lograr un rollito delgado (menor a 3.2 mm) fisurado, se divide en dos partes la muestra y se coloca en capsulas para su secado en el horno por 24 horas.

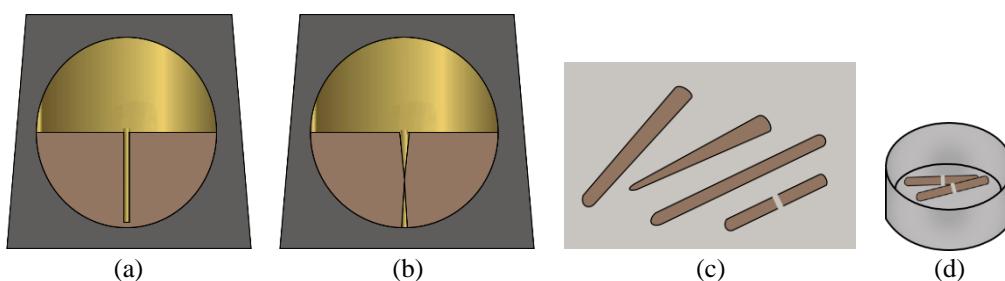


Figura 3.5: Ensayo de límite líquido: a) muestra en la Cuchara de Casagrande dividida por el ranurador, b) cierre de ranura alrededor de 13 mm. c) Ensayo de límite plástico: se forma rollitos de 3.2 mm de diámetro. d) Al finalizar ambos ensayos, las muestras se colocan en el horno por 24 horas

e) Ensayo de difracción de rayos X (XRD)

El ensayo analiza la composición mineralógica del suelo a través de la técnica de difracción de rayos X determinando las estructuras cristalinas presentes en la composición. De este modo, se define el tipo de arcilla que compone el suelo y en qué proporción se encuentra con el fin de evitar el uso de un suelo con presencia de arcillas expansivas. El ensayo de XRD generalmente se efectúa a la proporción más última del suelo, es decir, a todo lo que pasa por la malla #200. Como parte de la preparación de la muestra, se elimina agentes cementantes y componentes amorfos, lo que incluye la eliminación de carbonatos, materia orgánica, óxidos de hierro libres, óxidos de manganeso, sílice y alúmina. El ensayo se puede efectuar mediante la técnica de separación por decantación, centrifugación o super centrifugación.

f) Ensayo de fluorescencia de rayos X (XRF)

El ensayo se ejecuta según la Norma ASTM D5381-93 (2021), analiza la composición química del suelo se obtiene por medio del análisis de espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF) a través de un espectrómetro ARL OPTIM'X. De esta manera, se puede conocer el contenido de óxidos presente en el material en estudio, así como la presencia de material orgánico. El ensayo consiste en la interacción entre un haz de fotones y el material, se emite rayos X para eliminar los electrones de los átomos dejándolos en un estado excitado. Para la etapa de relajación de los átomos se libera el exceso de energía en forma de radiación de rayos X, la energía e intensidad de esta radiación depende de la composición de cada material.

3.2.2 Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo SB

El proceso de mejoramiento de las propiedades físicas del suelo SB tiene por objetivo que el suelo sea el idóneo para la fabricación del mortero de la matriz. Un suelo idóneo es aquel que cumple con la granulometría y la plasticidad indicados en Tabla 3.1 y Tabla 3.2, respectivamente, además de las recomendaciones de Ribeiro (2015). Una vez realizado el análisis granulométrico del suelo SB, se verifica que la curva se encuentre dentro del huso granulométrico propuesto por Norma ARS 681 (1996) de lo contrario se realiza un mejoramiento. El suelo mejorado para mortero (SMM) se obtiene mediante el tamizado y la adición de arenas, para lo cual, previamente se ha efectuado un análisis granulométrico y mineralógico a los agregados. La malla que se utiliza para tamizar el suelo SB depende del

espesor de la matriz de reforzamiento que normalmente es de 20 mm, esto quiere decir cuantos menor es el espesor mayor es la fineza que requerirá el suelo. Guillaud, Joffroy, Odul, & CRA Terre-EAG (1985), indican que el suelo para mortero no debe tener partículas mayores a 2 mm (malla #10). La proporción en que se añade las arenas depende de las curvas granulométricas del suelo SB y las arenas, la finalidad de mezclar estos dos materiales es obtener una curva dentro de los límites del huso. En la Figura 3.6 se presenta las curvas granulométricas del suelo SB (verde) y del suelo SMM (azul). Se observa que, el suelo SB se encuentra fuera del huso recomendado, luego de mejorararlo se obtiene la curva del suelo SMM que sí se encuentra dentro del huso respectivo.

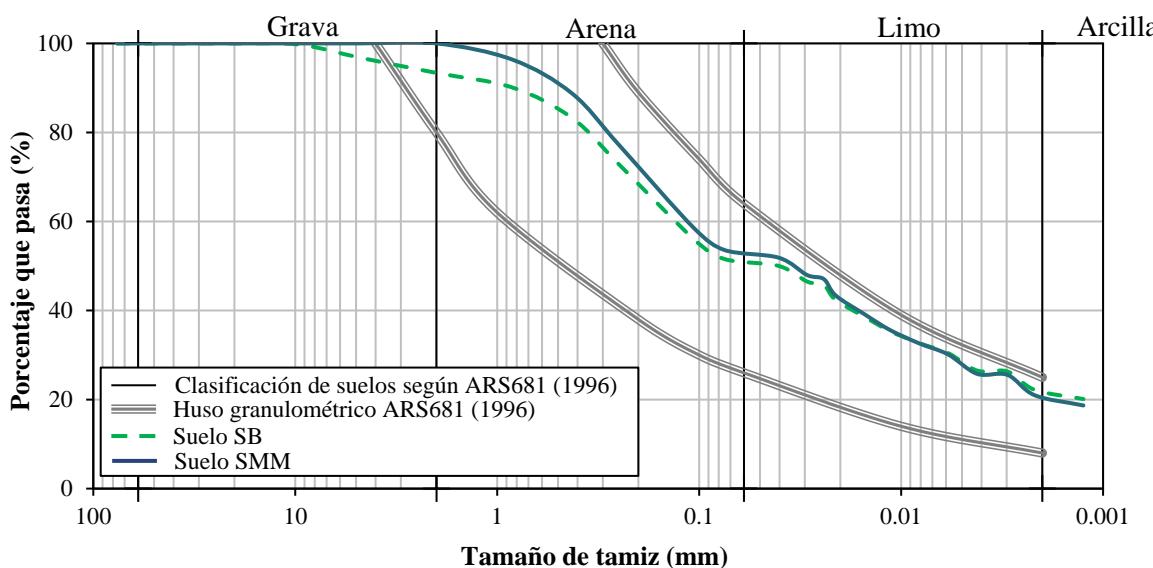


Figura 3.6: Mejoramiento de la curva granulométrica del suelo SB

3.2.3 Selección del refuerzo superficial

a) La geomalla

La geomalla es un tipo de geosintético del grupo de los termoplásticos, está compuesto por cadenas de polímeros ordenadas en fibras alineadas continuas que brindan un comportamiento anisotrópico (Callister & Rethwisch, 2012). Según la Norma ASTM D6637 (2015), la geomalla es toda red de elementos integrados derivados de polímeros como: el polietileno (PE), politereftalato de etileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), poliamida, poliéster, etc. La variabilidad de uso, facilidad de implementación, relación peso – resistencia y asequibilidad de precio, permiten que sean comúnmente utilizadas como refuerzo y estabilizador de suelo en importantes obras civiles (Fares, Hassan, & Arab, 2020). Otras funciones como de separación, protección, drenaje y filtración propician que las geomallas se empleen en la construcción de pavimentos, muros de

contención, taludes y terraplenes. La composición del material posibilita que estas puedan ser aplicadas a las estructuras mencionadas al presentar poca permeabilidad, alta durabilidad y, muy buena resistencia a la corrosión y al ataque por agentes químicos (Maras & Kose, 2019). Entre las geomallas se puedes distinguir fibras principales y transversales, donde la orientación y tamaño de apertura de las fibras integradas, aparte de la composición del material, permiten establecer una clasificación del refuerzo. De acuerdo a la orientación de las fibras, esta se dividen en tres categorías principales: uniaxial, biaxial y triaxial presentadas en la Figura 3.7. Esta orientación define ciertas características de rendimiento a partir de la resistencia a tracción y la capacidad de enlace de las fibras integradas. Las geomallas uniaxiales se distinguen por resistir esfuerzos en una dirección, a diferencia de los biaxiales o triaxiles que son capaces de soportar esfuerzos en más de una dentro de un mismo plano (Mulabdić, Minažek, & Kaluđer, 2018). A pesar de que las geomallas triaxiales son más resistentes y rígidas que las biaxiales por la isometría radial de disposición de las fibras, no son lo suficientes para alcanzar niveles altos de sismicidad sino moderados (Fares et al., 2020). Esto debido a que, la resistencia a tracción de la geomalla biaxial se dispone equitativamente en la dirección longitudinal y transversal, mejorando el comportamiento frente a cargas sísmicas por la capacidad de disminuir la deformación lateral y vertical según la dirección de llegada de las fuerzas de tracción a la estructura (Fares et al., 2020; Mohamed, El Sebai, & Gabr, 2020; Mulabdić et al., 2018). Holliday et al. (2016) mencionan que, los esfuerzos de tracción que soportan los muros de las construcciones debido a cargas cíclicas en el plano son biaxiales, ya que los muros se comporta como una losa en dos direcciones. Solís et al. (2015) identifica que entre la geomalla de polipropileno triaxial y biaxial, este último presenta una mejor fuerza de unión mortero – refuerzo. Puesto que, al ser la geomalla triaxial más resistente y rígida tiende a generar desplazamientos pequeños en la matriz mortero – refuerzo, por ende, grietas dentro de este que puede terminar en el desprendimiento del sistema de reforzamiento estructural (Cárdenas & Luna, 2017).

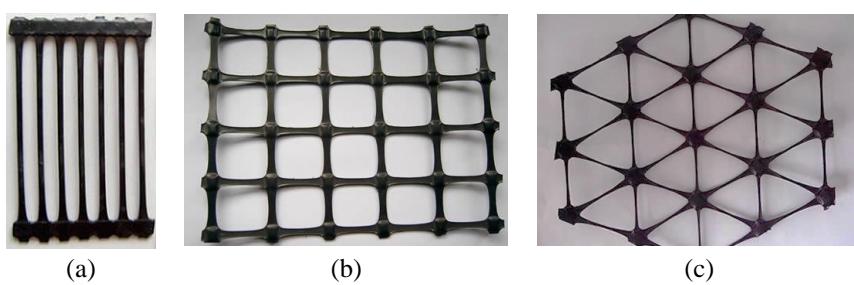
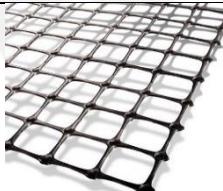


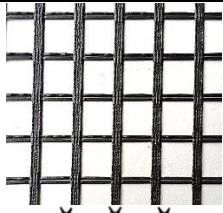
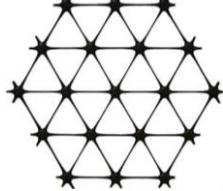
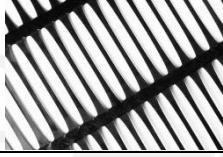
Figura 3.7: Tipos de geomalla: a) Uniaxial, b) Biaxial y c) Triaxial (<https://www.geogridfabric.com>)

Existe una serie de geomallas en base a la composición del material, disposición de las fibras y características geométricas. La instalación de un sistema de reforzamiento requiere la selección de un refuerzo que, además de ser compatible con el mortero, cumpla con los valores mínimos de ciertas propiedades mecánicas como son de resistencia y alargamiento a la rotura (Callister & Rethwisch, 2012). Con la finalidad de que la transferencia de tensión del mortero a las fibras en la unión mortero – refuerzo sea la máxima durante un evento sísmico. Comercialmente se puede encontrar geomallas fabricadas a base de polietileno (PE), politereftalato de etileno (PET), polietileno de alta densidad (HDPE), polipropileno (PP), poliamida, poliéster, fibra de carbón y fibra de vidrio (Mulabdić et al., 2018). Estas se distribuyen en tres principales presentaciones, como geomallas uniaxiales, biaxiales y triaxiales, cuyas dimensiones de apertura son indistintas al igual que el espesor de fibras. En la Tabla 3.3 se presenta algunas de las geomallas disponibles, ordenadas de acuerdo a su efectividad para ser utilizados como reforzamiento estructural. Las primeras cinco geomallas al ser al tipo biaxial son consideradas como las más ideales, les sigue las triaxiales y, por último, las uniaxiales.

Tabla 3.3: Geomallas disponibles en el mercado de acuerdo al polímero de composición

Nº	Geomalla	Polímero	Dimensión nominal de apertura (mm)		Espesor nominal mínimo de fibra (mm)		
			MD	XMD	MD	XMD	
1	Biaxial Tensar BX 1100		Polipropileno	25.0	33.0	0.76	0.76
2	Biaxial Tensar BX 3030		Polipropileno	38.0	38.0	2.40	1.30
3	Biaxial PET 350 – 30		Poliéster	40.0	40.0	5.85	5.85
4	Biaxial Miragrid 3XT		Poliéster de alta densidad	22.2	25.4	3.40	2.40

Continuación de la Tabla 3.3: Geomallas disponibles en el mercado de acuerdo al polímero de composición

Nº	Geomalla	Polímero	Dimensión nominal de apertura (mm)		Espesor nominal mínimo de fibra (mm)		
			MD	XMD	MD	XMD	
5	Biaxial MACGRID AR 10.7		Fibra de vidrio	25.0	25.0	5.50	5.50
6	Triaxial Tensar TX 160		Polipropileno	40.0	40.0	1.40	1.20
7	Uniaxial Tensar UX1000MSE		Polietileno de alta densidad	-	1.00 – 3.00		
8	Uniaxial Carbon Fiber		Fibra de carbono	-	~ 0.50		

b) Ensayo de tensión directa

El ensayo de tensión directa permite determinar la resistencia, ductilidad y comportamiento del refuerzo según la dirección en que las fibras son ensayadas. Las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo son la resistencia a la rotura, deformación máxima y módulo de elasticidad. Tras el ensayo, se puede asegurar que el refuerzo escogido cumple con las propiedades mecánicas adecuadas y compatibilidad con el sistema de albañilería de BTC-E.

El ensayo se ejecuta mediante la norma ASTM D6637 (2015). El espécimen es de 200 mm de longitud mínima en la dirección ensayada y debe contener al menos 6 fibras como se muestra en la Figura 3.8. El ancho del espécimen en la dirección transversal se limita por la cantidad de fibras, este debe contener de al menos 5. La máquina de prueba utilizada es adaptada con mordazas de acero del tipo clamping-grip para traccionar el espécimen. El ensayo se efectúa a una velocidad de deformación $10 \pm 3\%$ por minuto de la longitud del extensómetro.

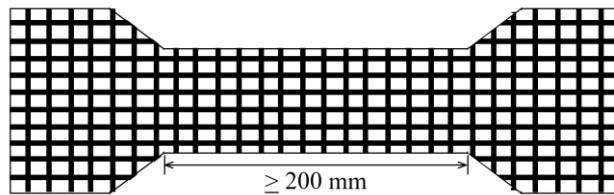


Figura 3.8: Esquema del espécimen de refuerzo

Después de ejecutar el ensayo se obtiene la curva típica de esfuerzo - deformación, presentada en la Figura 3.9. Esta curva se divide, básicamente, en tres zonas: elástica, elástica-plástica y plástica. En la zona elástica se puede estimar el Módulo de elasticidad (E) por medio de la Ley de Hooke como una relación entre el esfuerzo y deformación. La segunda zona se caracteriza por ser la zona de transición entre el rango elástico e inelástico. En la zona plástica se observa la deformación permanente del refuerzo, esta etapa se caracteriza por contener la resistencia máxima (σ_m) y deformación máxima (ε_m) además de, la resistencia a la ruptura (σ_u) (Donaire, 2016).

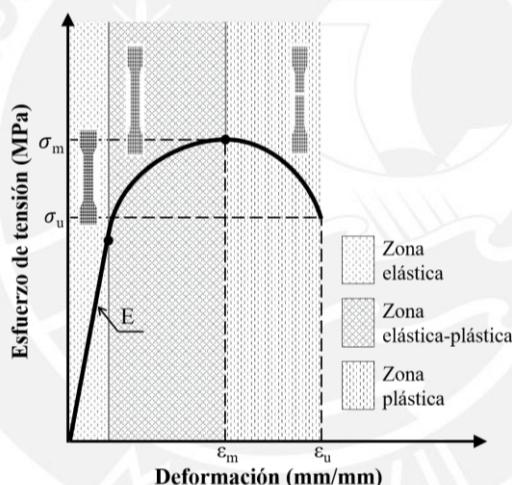


Figura 3.9: Curva típica esfuerzo - deformación

3.3 Etapa 2: Obtención del mortero estabilizado y evaluación de la durabilidad

Cuando el material de fabricación de los morteros para el reforzamiento estructural es definido, en concordancia con la normativa ARS 681 (1996), se procede a preparar diferentes dosificaciones en base a este material y estabilizantes. De esta manera, la fabricación de morteros se divide en dos etapas, estado fresco y endurecido, siendo caracterizadas física y mecánicamente. Así, para cada caracterización se establecen ensayos que permiten definir tanto la cantidad de agua como estabilizantes para la obtención de los morteros óptimos.

3.3.1 Proceso de estabilización química y producción

La norma ARS 681 (1996) menciona sobre la dosificación y estabilización con cemento para morteros de tierra, siendo recomendable utilizar de 6% a 12% respecto al suelo. Asimismo, Riberiro (2015) presenta morteros para el reforzamiento superficial estabilizados hasta con 25 % de cemento respecto del suelo. Por otro lado, para la estabilización con cal, la norma ARS 681 (1996) indica que añadir de 4 a 12% de cal apagada respecto al suelo producen resistencia parecidas al del cemento, con variaciones dependiendo del tipo de suelo y la cantidad de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presente en la cal, la cual debe estar presente entre 70 – 90%. La cantidad óptima de estabilizante varía según el tipo de suelo, Tate (2005) y Walker & Stace (1997) indican que la estabilización con cemento presenta un cambio mínimo en la resistencia a compresión si se sustituye hasta un 50% con cal. El proceso de estabilización química de los morteros se va a dividir en dos etapas: el análisis de la trabajabilidad de las dosificaciones para los morteros en estado fresco por medio de la caracterización física y, la determinación del contenido óptimo de estabilizante mediante la caracterización mecánica. Gomes et al. (2017), quien estudia morteros de tierra estabilizados con fibras, cal y cemento ha demostrado que existe una buena correlación lineal ($R^2 = 0.8495$) entre los ensayos de compresión unaxial y flexión en tres puntos (Gomes et al., 2017). Por lo que la realización de ensayos de compresión es más eficiente que los de flexión en tres puntos, los cuales solo se efectuaran en morteros de dosificación óptima.

La producción de los morteros inicia con el mezclado de los materiales secos, suelo SMM y estabilizantes según la dosificación propuesta, a velocidad baja por 45 segundos con la mezcladora Rubimix-7 con varilla (ver Figura 3.10a). Luego, se agrega gradualmente ¾ de la cantidad total de agua y se mezcla por 90 segundos más a velocidad baja – media (ver Figura 3.10b). Tras este tiempo, se detiene la mezcladora para limpiar las paredes del recipiente, con una espátula se retira el mortero adherido uniéndolo al resto (ver Figura 3.10c). El mezclado continúa por 60 segundos más a velocidad media – alta agregando la cantidad de agua sobrante con la finalidad de obtener una mezcla homogénea (ver Figura 3.10d). Mientras el mortero se encuentre en estado fresco, es vertido en dos capas en los moldes cada una es vibrada 10 veces con un martillo de goma; después se nivela y se retira el material sobrante de los moldes (ver Figura 3.10e). El curado consiste en cubrir las muestras con un plástico que mantenga estable la gradiete de humedad durante 24 – 48 horas. Una vez desmoldados son etiquetados y ubicados en un lugar apropiado con el fin de almacenarlo hasta alcanzar la edad necesaria para ser ensayados (ver Figura 3.10f). El proceso de

producción de los morteros termina cuando el número de muestras en estado fresco (ensayo de esparcimiento) y estado endurecido (ensayo de compresión uniaxial y flexión en tres puntos) es cubierto.

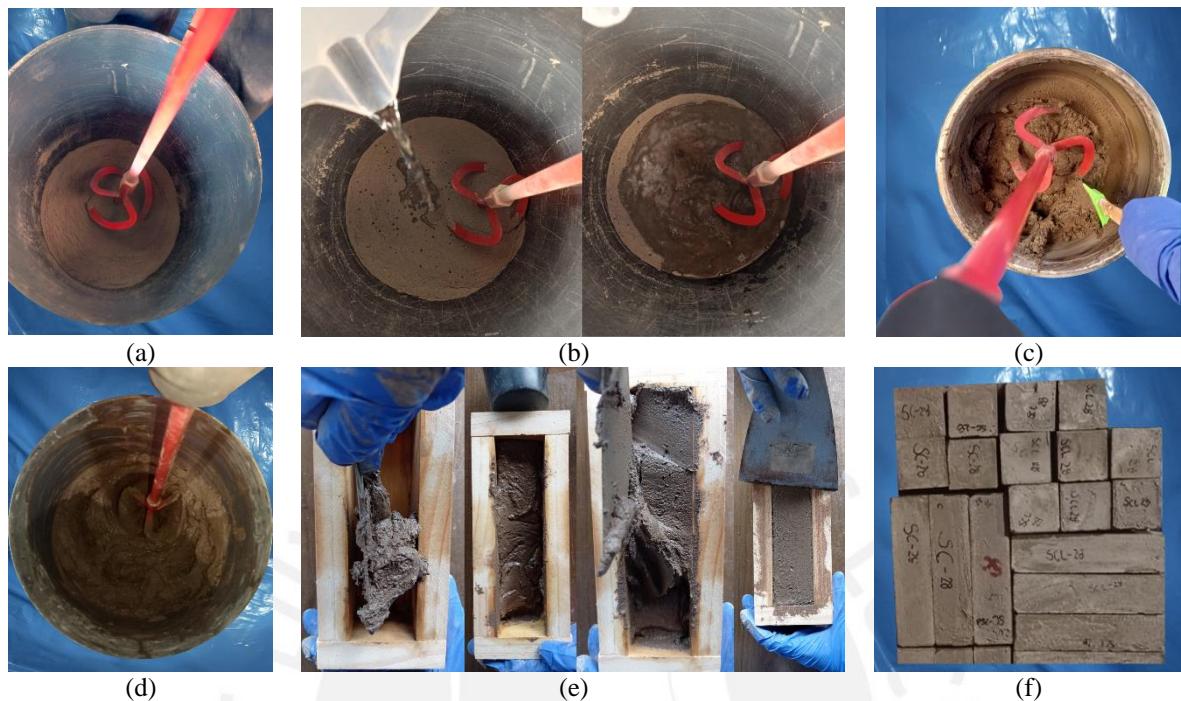


Figura 3.10: a) Mezclado de los materiales secos: suelo SMM y estabilizante, b) Añadir $\frac{3}{4}$ de agua y mezclar a velocidad baja, c) detener el mezclador para limpiar las paredes del recipiente y d) se obtiene una mezcla homogénea. e) Con el mortero en estado fresco, se prepara las muestras colocando la mezcla en dos capas. f) Por último se almacenan hasta su ensayo

3.3.2 Ensayos para la caracterización física del mortero

a) Ensayo de esparcimiento

Los morteros pueden ser clasificados según el sistema de fabricación, composición y aplicación. En esta última categoría se encuentra el mortero de revestimiento, reforzamiento superficial, revoco, o enfoscado, denominado de esta manera por la forma de aplicación sobre algún elemento constructivo con la finalidad de recubrirlo por razones estéticas o funcionales (AFAM, s. f.). El ensayo de esparcimiento tiene como finalidad evaluar la consistencia del mortero en estado fresco a través de la capacidad de esparcimiento, permitiendo conseguir una medida de fluidez o contenido de humedad del mismo cuando está sujeto a cierto tipo de tensión (M.I. Gomes, Gonçalves, & Faria, 2012b). La importancia del parámetro es porque se busca un mortero trabajable que permita preparar y colocar la mezcla sobre algún elemento de apoyo de manera fácil, esta característica usualmente es influenciada por el contenido de agua (Gomes et al., 2012b). La Tabla 3.4 presenta los valores de esparcimiento (medida de

trabajabilidad) obtenidos por diversas investigaciones para morteros de reforzamiento de tierra estabilizada.

Tabla 3.4: Valores de esparcimiento para morteros de tierra estabilizada

Autor	Año	Esparcimiento (mm)	Calificación de adherencia por los operadores
Delinière et al.	2014	175	Excelente
Faria et al.	2016	182.8 ± 2.5	-
Gomes et al.	2012b	160 - 200	Excelente
Ribeiro	2015	180	-

Este ensayo se realiza siguiendo la Norma ASTM C230 (2021) y su equivalente europeo UNE EN 1015-3 (2000). La Figura 3.11 muestra el proceso de ejecución del ensayo, se inicia colocando el molde cónico en el centro de la mesa de flujo, después llenándolo con la muestra en dos capas compactando cada una 10 veces. Luego, se retira el exceso de muestra de la parte superior y se limpia tanto la parte inferior como la mesa manteniendo centrado el molde durante todo este proceso. Después, se retira el molde levantándolo hacia arriba con cuidado y se sacude la mesa 15 veces por 15 segundos. El esparcimiento se determina midiendo el diámetro de la muestra en dos direcciones perpendiculares, la norma recomienda ensayar como mínimo 2 muestras por dosificación.

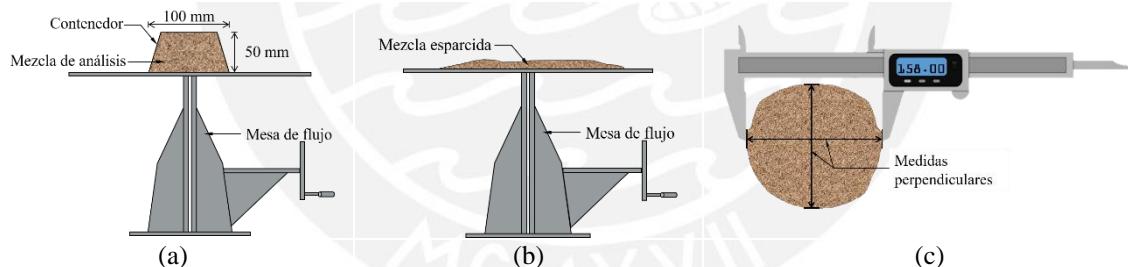


Figura 3.11: Ensayo de esparcimiento: a) instrumento b) retiro del contenedor para después sacudir la mesa c) medida del esparcimiento del mortero

3.3.3 Ensayos para la caracterización mecánica del mortero

a) Ensayo de compresión uniaxial

El ensayo de compresión uniaxial permite conocer la resistencia del mortero endurecido, es un parámetro de evaluación para definir la cantidad de estabilizante presente en cada dosificación de mortero. Se busca obtener, como un valor preliminar, una resistencia similar o mayor que los BTC-E, luego se continua con la caracterización mecánica mediante el ensayo de flexión en tres puntos.

El ensayo sigue los lineamientos de la ASTM C109 (2020) y las recomendaciones de la UNE EN 1015-11 (2020). La Figura 3.12 esquematiza como se ejecuta el ensayo mediante la aplicación de una carga aplicada a velocidad constante igual a 1 mm/min. A fin de comprender la evolución de resistencia en el tiempo, se recomienda realizar el ensayo a 7, 14, 21 y 28 días de edad, siendo ensayado como mínimo 6 especímenes cúbico de 50 mm por cada edad. El esfuerzo de compresión (f_c) en MPa se calcula utilizando la ecuación (3.6), donde P corresponde a la carga máxima registrada en Newton y A al área de contacto en mm^2 . Además, se determinar la variación de los resultados mediante el coeficiente de variación (CV), este se calcula como lo indica la ecuación (3.7) donde S es la desviación estándar y \bar{X} es el promedio de los resultados.

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (3.6)$$

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (3.7)$$

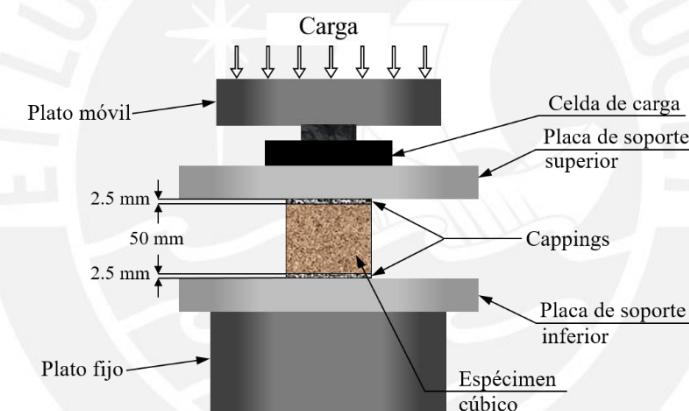


Figura 3.12: Configuración del ensayo de compresión en muestras cúbicas de 50 mm

b) Ensayo de flexión en tres puntos

La finalidad del ensayo de flexión en tres puntos es determinar la resistencia a la flexión (f_b) también conocido como módulo de ruptura (MR) como parte de la caracterización mecánica de los morteros estabilizados con cal y cemento.

El ensayo de flexión en tres puntos se ejecuta según las indicaciones de la ASTM C348 (2020) y la UNE EN 1015-11 (2020). La máquina de prueba es la de compresión, la cual es adaptada como se presenta en la Figura 3.13a, el espécimen es colocado sobre el adaptador que se muestra en la Figura 3.13b. El ensayo se ejecuta mediante la aplicación de una carga constante de velocidad igual a 0.3 mm/min., la UNE EN 1015-11 (2020) recomienda que durante el ensayo la ruptura de la muestra debe ocurrir entre 30 y 90 segundos. A fin de comprender la evolución de resistencia en el tiempo, se recomienda realizar el ensayo a 7, 14,

21 y 28 días de edad siendo ensayado como mínimo 5 especímenes prismáticos de 40 x 40 x 160 mm por cada edad.

El MR (f_b) se calcula en MPa utilizando la ecuación (3.8), donde l corresponde a la luz libre entre apoyos en mm, F_{max} es la carga máxima registrada en Newton, b y H corresponden al ancho y altura del espécimen, ambos en mm. Por otro lado, el módulo de flexión (E_f) se determina en MPa utilizando la ecuación (3.9) como una relación entre esfuerzo y desplazamiento ($\Delta f b / \Delta x$) de la parte inicial de la pendiente de la curva. Asimismo, se muestra la variación de los resultados a través del coeficiente de variación (CV), este se calcula mediante la ecuación (3.7).

$$f_b = \frac{3 l F_{max}}{2 b H^2} \quad (3.8)$$

$$E_f = \frac{l^2}{6H} \left(\frac{\Delta f b}{\Delta x} \right) \quad (3.9)$$

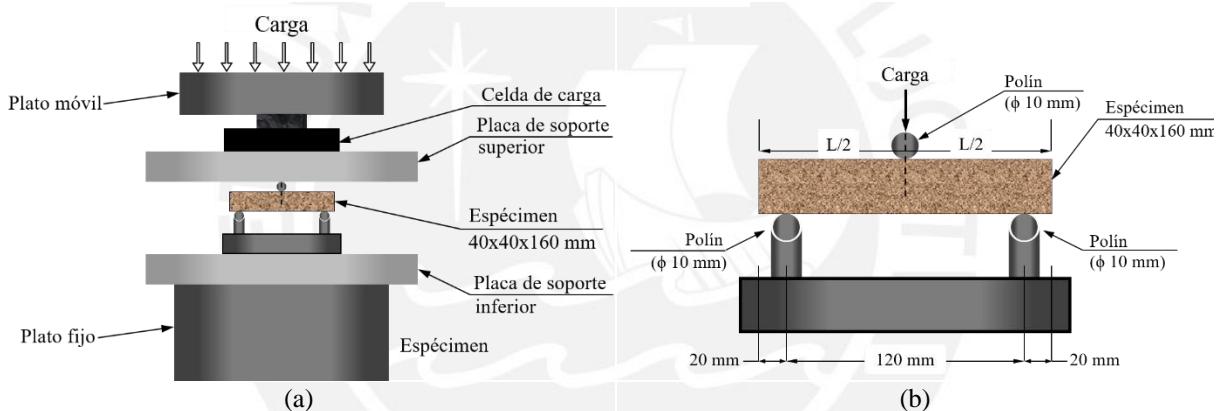


Figura 3.13: Ensayo de flexión en tres puntos: a) la colocación en la máquina de prueba y b) configuración del ensayo

3.3.4 Ensayos para la evaluación de la durabilidad frente a erosión por agua

Las construcciones de tierra son susceptibles frente agentes externos, específicamente al ataque de agua, perdiendo funcionalidad estructural debido al daño causado por la humedad y la erosión de agua de lluvia (Cid, 2012). Así, es importante realizar un estudio de durabilidad al mortero del reforzamiento estructural, a través de ensayos de permeabilidad, absorción y erosión que evalúan el efecto del agua sobre este. De esta manera, se puede determinar si los morteros óptimos son durables en el tiempo tras estar sometidos a condiciones climáticas que pueden ocurrir en el país.

a) Ensayo de permeabilidad por ángulo de contacto

La permeabilidad es una característica esencial para evaluar la capacidad de humectación producido por la interacción de un material sólido poroso y un líquido, esto se realiza a través del ángulo de contacto por el método de caída sésil (Yuan & Lee, 2013). El grado de humectación es medido según el ángulo formando entre el punto de contacto y la tangente de la gota como se presenta en la Figura 3.14. Yuan & Lee (2013) mencionan que, cuando el ángulo de contacto es mayor a 90° la muestra se considera hidrófoba (baja permeabilidad) y es hidrofílica (alta permeabilidad) cuando son ángulos menores a 90° .

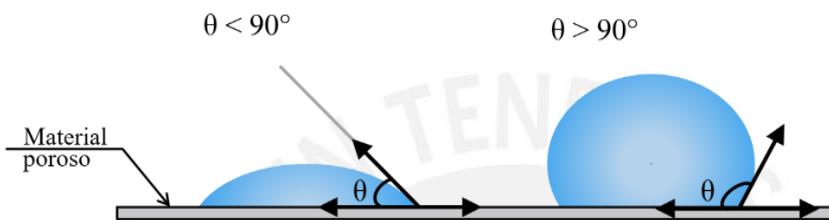


Figura 3.14: Esquema de los ángulos de contacto del ensayo de permeabilidad

Con la finalidad de evaluar la permeabilidad y como afecta a la durabilidad de la matriz se debe preparar especímenes de mortero con forma y dimensiones indiferentes, siendo el ensayo ejecutado a los 28 días o más.

b) Ensayo de absorción por capilaridad

El ensayo de absorción es un indicador de la velocidad de captación de agua procedentes de agentes externos en condiciones ambientales además, brinda una idea general de la presencia e importancia de los poros (Guettala et al., 2002). A pesar de no ser un ensayo común para evaluar el comportamiento de morteros frente agentes externos, es importante realizarlo porque permite reconocer la resistencia a la absorción capilar cuando es aplicado sobre un sistema de albañilería (Faria et al., 2016). Gomes et al. (2017) indica que, una mayor absorción capilar de agua se debería al tipo de arcilla presente en el suelo y en caso de estar estabilizado, a la cantidad de cemento presente en el mortero.

Este ensayo se efectúa según lo que indica la Norma UNE EN 1015-18 (2003), adaptado a las dimensiones del espécimen, y las recomendaciones de Nakamatsu et al. (2017). El procedimiento consiste en sumergir una cara del espécimen 5 mm en agua potable durante un tiempo determinado. Las caras laterales del espécimen deben ser revestido con papel filtro no absorbente, así se garantiza que la absorción y evaporación se produzca por la cara inferior y superior respectivamente (Lima et al., 2020). Además, se recomienda que el espécimen no esté en contacto directo con el recipiente, el uso de soportes y papel filtro,

como se muestra en la Figura 3.15, permite que la cara inferior se encuentre solo en contacto con el agua y se evita la pérdida del material. Adicionalmente, al realizar la sumersión se podría cubrir el espacio con algún plástico para minimizar la evaporación. Los intervalos de tiempo propuesto son 0.02, 0.05, 0.08, 0.13, 0.20, 0.25, 0.33, 0.5, 0.75, 1, 3, 5, 8, 12, 24 horas con el fin de evaluar la rapidez de captación de agua de los morteros en el tiempo. Después, se retira el espécimen y se limpia el agua superficial para ser pesado, este proceso no debe durar más de 5 minutos. La normativa exige ensayar como mínimo 4 especímenes cúbicos de 50 mm a los 28 días de edad o más.

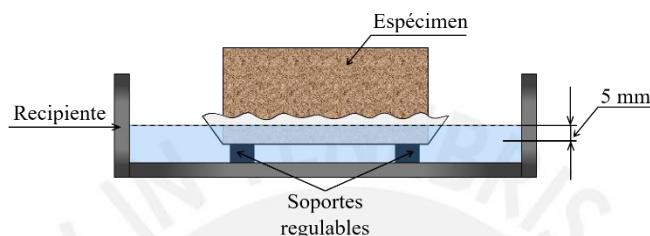


Figura 3.15: Configuración del ensayo de absorción por capilaridad

La capacidad de absorción (C_a) se calcula utilizando la ecuación (3.10), donde W_s corresponde al peso del espécimen saturado (después de la sumersión) y W_d es el peso seco del espécimen. Asimismo, se puede calcular la velocidad de absorción por capilaridad (V_a) en base a la ecuación (3.11) donde A en m^2 es el área bruta en contacto y t es el tiempo.

$$C_a (\%) = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.10)$$

$$V_a (kg/m^2 \cdot min^{0.5}) = \frac{W_s - W_d}{A\sqrt{t}} \quad (3.11)$$

c) Ensayo de absorción total

El ensayo de absorción total se realiza con el fin de conocer la capacidad máxima de absorción de agua, permitiendo determinar la dimensión de los poros del material absorbente. Asimismo, tiene una estrecha relación con la permeabilidad, pues si la muestra es permeable entonces es porosa siendo la capacidad de captación de agua mayor y tiendiendo a la desintegración del material. Sharma, Marwaha, & Vinayak (2016) añade que, la cantidad de agua absorbida aumenta a medida que la presencia de cemento es menor, al ser un estabilizante poco eficaz con los materiales arcilloso.

Este ensayo se efectúa según lo que indica la ASTM C67 (2020) cuyo equivalente peruano es NTP 399.613 (2017), se aplican ciertas modificaciones que se adecuen a los especímenes de mortero. El procedimiento consiste en sumergir el espécimen en un recipiente de agua potable, como se muestra Figura 3.16, por un tiempo igual a 0.02, 0.05,

0.08, 0.13, 0.17, 0.25, 0.5, 1, 3, 5, 12, 24, 48, 72 y 96 horas con el fin de evaluar la capacidad de absorción en el tiempo. Después, se retira el espécimen y se limpia el agua superficial para ser pesado, este proceso no debe durar más de 5 minutos. La normativa exige ensayar como mínimo 4 especímenes cúbicos de 50 mm a los 28 días de edad o más.

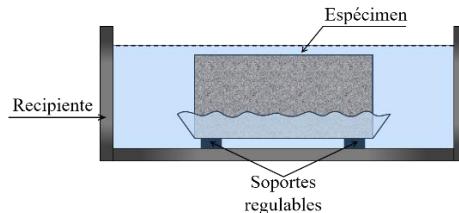


Figura 3.16: Configuración del ensayo de absorción total

La capacidad de absorción total de agua (CT_a) se calcula utilizando la ecuación (3.12), donde W_s corresponde al peso del espécimen saturado (después de la sumersión) y W_d es el peso seco del espécimen (previamente horneado a 60°C por 15 minutos).

$$CT_a (\%) = \frac{W_s - W_d}{W_d} \times 100 \quad (3.12)$$

Al finalizar el ensayo, se obtiene curvas de absorción total hasta las 24 horas, después de este tiempo se determina la cantidad máxima de absorbida, expresado en %, para ser evaluado según los criterios establecidos por la normativa internacional que se presenta en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5: Criterio de evaluación del ensayo de absorción total (adaptada de Esteve, 2016)

Norma	Año	Nº muestras	Criterio
IS 1725	1982	1	$\leq 15\%$
NBR 8492	2012	3	-
ARS 683	1996	-	$\leq 15\%$
SLS 1382	2009	3	$< 15\%$

d) Ensayo de humectación y secado cíclico (w – d)

El ensayo de humectación y secado cíclico es considerado como un ensayo de erosión por los cambios climáticos que simula para un periodo a lo largo de la vida útil del elemento. En este caso, se busca determinar la pérdida de material del espécimen de mortero además, identifica la resistencia y estabilidad del mismo ante la exposición de ciclos ambientales severos (Donrak et al., 2018). Fitzmaurice (1985) recomienda que la pérdida del material no debería superar el 5% en regiones con precipitación anual mayor a 500 mm, ni el 10% en regiones con precipitación anual menor a 500 mm (como se citó en Izemmouren et al., 2015). Adicionalmente, esta prueba guarda relación con el ensayo de congelación/descongelación que es ideal para simular climas extremos (Morel et al., 2012).

Este ensayo se efectúa según lo que indica la ASTM D559 (2015) con ciertas modificaciones adoptadas de Donrak et al. (2018). La Figura 3.17 presenta las dos etapas del ensayo que corresponde a un ciclo w – d (*wetting – drying*): la primera se basa en sumergir el espécimen completamente en agua potable por un periodo de 6 horas para luego ser retirado y, la segunda, en el secado en horno a 60°C por 42 horas (Cid, 2012). Después de cada ciclo w – d, se debe limpiar la superficie del espécimen para remover fragmentos de material que puedan afectar el ensayo (Guettala et al., 2002). El número de ciclos w - d propuestos para someter al espécimen cúbicos de 50 mm es 1, 3, 5, 8 y 12 con el fin de evaluar la perdida de material en cada ciclo. La forma y dimensiones del espécimen es indefinido, se sugiere ensayar al menos 4 espécimen de 28 días de edad o más por cada ciclo.

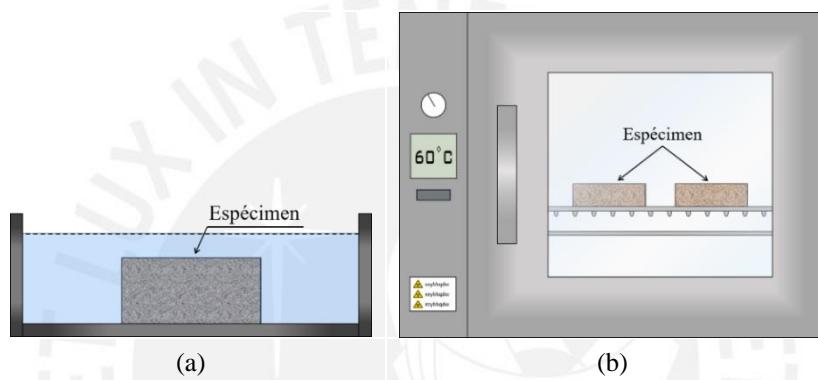


Figura 3.17: Esquematización del ensayo: a) humectación y b) secado

La pérdida de material al término de cada ciclo (WL_{w-d}) se obtiene mediante la ecuación (3.13), donde W_i es el peso al inicio del ensayo y W_{w-d} , el peso al final del ciclo w – d correspondiente.

$$WL_{w-d} (\%) = \frac{W_i - W_{w-d}}{W_i} \times 100 \quad (3.13)$$

e) Ensayo de erosión por goteo

El ensayo de erosión por goteo se realiza con el objetivo de conocer la resistencia del mortero frente al agua, pues es importante proteger al refuerzo de los agentes externos que afecten la durabilidad, en consecuencia, la resistencia del reforzamiento estructural. El goteo constante sobre la muestra permite evaluar la susceptibilidad a la degradación inducida por el agua, lo que representa las lluvias producidas en una región con precipitación anual mayor a 500 mm considerada como precipitación moderada (Morel et al., 2012). En base a lo mencionado se establece una escala de evaluación de erosionabilidad que se presentada en la Tabla 3.6, donde D es la profundidad de perforación en mm.

Tabla 3.6: Escala de erosionabilidad para el ensayo de erosión por gota

Índice de erosionabilidad	Profundidad	Resultados	
	(mm)	NZS 4298 (2020)	Morel et al. (2012)
1	0	Apto	No erosivo
2	$0 < D \leq 5$	Apto	Poco erosivo
3	$5 < D \leq 10$	Apto	Erosivo
4	$10 \leq D$	No apto	Muy erosivo

Este ensayo se ejecuta siguiendo los lineamientos de la Norma NZS 4298 (2020). El procedimiento consiste en dejar caer una corriente continua de agua sobre el espécimen ubicado a 400 mm debajo del punto de goteo, este se encuentra ubicado sobre una superficie con inclinación de 27° respecto a la horizontal como se presenta en la Figura 3.18. La velocidad de goteo idealmente es de 5 mL por minuto según la NZS 4298 (2020), el tiempo de exposición es de 20 - 60 minutos como máximo a fin de evaluar la resistencia de erosionabilidad en el tiempo. El espécimen de $200 \times 100 \text{ mm}^2$ a ensayar debe tener un espesor entre 10 – 20 mm, según sea el espesor de la matriz que se desea evaluar, se sugiere ensayar al menos 3 muestras de 28 días de edad o más.

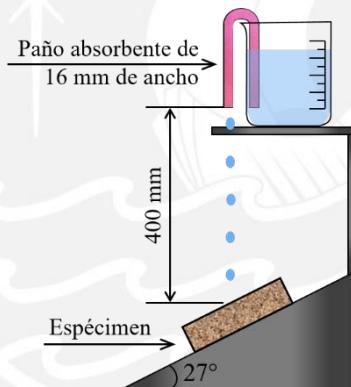


Figura 3.18: Configuración del ensayo de erosión por goteo

f) Ensayo de erosión acelerada

El ensayo de erosión acelerada desarrolla dos condiciones de erosión frente a la precipitación: humidificación debido al aumento del contenido del agua en el espécimen desencadenando la disminución de la cohesión interna, y la energía de impacto del agua sobre la muestra debilitando o rompiendo los enlaces de cohesión ya débiles (Morel et al., 2012). Así, se puede evaluar el grado de erosión de la matriz ocasionada por el agua a lo largo de un periodo de tiempo de más de 50 años, en una zona con intensidad de lluvia de 50 mm, simulado por precipitación severa en 1 hora a través del ensayo de erosión acelerada (Cid, 2012; Medvey & Dobszay, 2020).

Este ensayo se ejecuta siguiendo los lineamientos de la Norma NZS 4298 (2020), donde se indica que el procedimiento consiste en rociar agua sobre la superficie del espécimen ubicado a una distancia de 470 mm del punto de salida, como se presenta en la Figura 3.19. La presión de salida de agua es 50 kPa por un tiempo de exposición de 60 minutos o hasta que la muestra alcance un daño significativo, después se mide la profundidad de la humedad. Con el objetivo evaluar el comportamiento de erosión en el tiempo, se sugiere registrar la profundidad de hundimiento por la erosión y el peso en intervalos de 15 minutos. El espécimen a ensayar es de $250 \times 250 \text{ mm}^2$ y de espesor entre 10 – 20 mm, según sea el espesor de la matriz que se desea evaluar, se sugiere ensayar al menos 4 muestras de 28 días de edad o más.

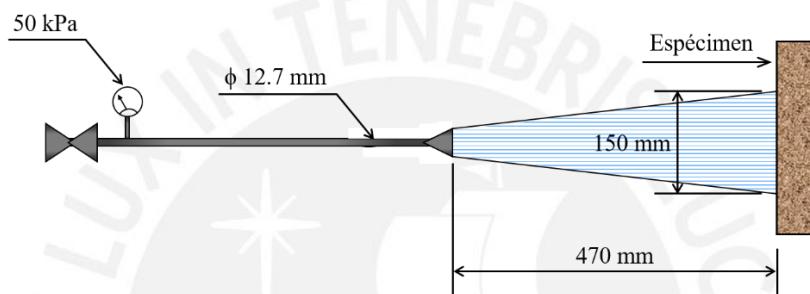


Figura 3.19: Configuración del ensayo de erosión acelerada adaptada

Al finalizar el ensayo, se mide la profundidad de erosión final rompiendo la muestra por el punto más profundo, en base a esto se establece un índice de erosionabilidad presentada en la Tabla 3.7, donde d es la profundidad de perforación en mm. Según la Norma NZS 4298 (2020), se considera que el material ha fallado cuando tiene una profundidad de más de 120 mm, otros autores consideran el grosor máximo de erosión debería ser 60 mm o cuando se haya penetrado la parte posteriores (Morel et al., 2012).

Tabla 3.7: Escala de erosionabilidad por erosión acelerada (adaptada de NZS 4298, 2020)

Índice de erosionabilidad	Profundidad (mm)	Resultados
1	$0 \leq d < 20$	No erosivo
2	$20 \leq d < 50$	Poco erosivo
3	$50 \leq d < 90$	Erosivo
4	$90 \leq d < 120$	Muy erosivo
5	$120 \leq d$	Falla

3.4 Etapa 3: Desarrollo de la matriz para el refuerzamiento estructural

Esta etapa busca caracterizar mecánicamente a la matriz compuesta por morteros estabilizados y definido el refuerzo (geomalla) para obtener sus propiedades mecánicas y patrones de agrietamiento ante fuerzas de tracción y flexión. Asimismo, a partir del estudio

de la interacción mecánica entre la matriz y la albañilería de BTC se determina la compatibilidad entre estos dos además de patrones de desprendimiento.

3.4.1 Ensayo de tracción directa

El ensayo de tracción facilita la obtención de los valores de esfuerzo de tracción y el módulo de elasticidad de la matriz, parámetros que permiten comprender el comportamiento de la rigidez de tensión del mortero y la respuesta de la geomalla en la matriz. Esto último se conoce como corte elástico y se entiende como la adhesión que existe entre la geomalla y el mortero, lo que permite determinar si existe una adecuada compatibilidad entre sí (Antunes & Masuero, 2016). Además, el ensayo permite determinar el comportamiento de unión entre el refuerzo y el mortero indirectamente a través de los patrones de gritas de la matriz ensayada (Olivito et al., 2014).

El ensayo se ejecuta según las recomendaciones de RILEM Technical Committee 232-TDT (2016) y los lineamientos de la guía AC 434 (2011), el espécimen propuesto está compuesto por dos capas de los morteros y una capa de refuerzo situada entre ellas. Los detalles geométricos se presentan en la Figura 3.20, se observa que el ancho es 120 mm, que corresponde como mínimo a 3 fibras del refuerzo y el largo igual a 450 mm para asegurar la transferencia de carga. Mientras el espesor de la matriz depende del revestimiento superficial del sistema de albañilería, la Norma NTE E.070 (2006) señala que el valor varía entre 10 y 20 mm. Para una evaluación detallada, se establece dos variables, la composición del mortero y el espesor, con la finalidad de conocer la influencia en el comportamiento de la matriz.

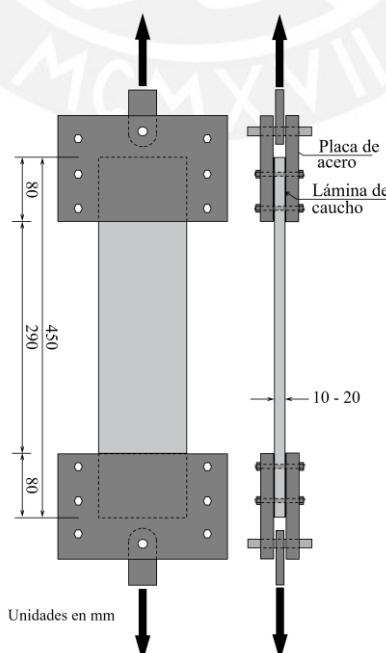


Figura 3.20: Configuración del ensayo de tracción

La fabricación del espécimen se muestra en la Figura 3.21, durante la colocación del refuerzo se debe procurar que esté completamente embebido en el centro conservando su linealidad. Después, de 8 horas se puede desmoldar las muestras para almacenarlos manteniendo su curado con las condiciones apropiadas hasta los 28 días de edad. A lo largo de este tiempo se debe estar atento que el espécimen no desarrolle microfisuras por contracción de secado.

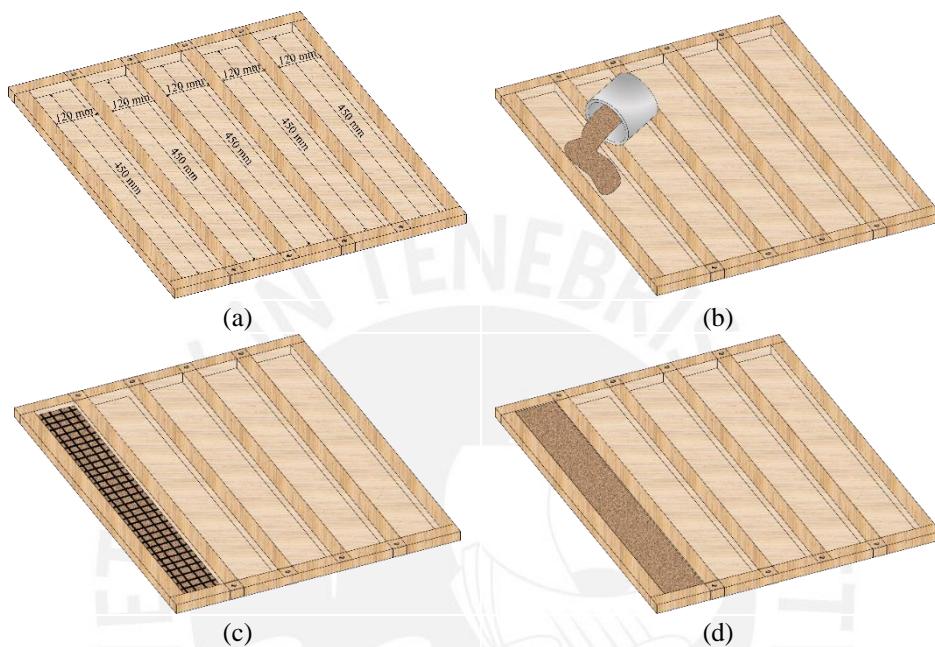


Figura 3.21: Proceso de fabricación del espécimen del ensayo de tracción: a) molde, b) llenar el molde con una capa fina de 5 – 10 mm de mortero, c) colocar la geomalla en el centro, d) agregar otra capa de mortero de espesor igual a la primera

La máquina de prueba para ejecutar el ensayo es adaptada con unas mordazas de acero del tipo clamping-grip como se presenta en la Figura 3.20. Asimismo, para evitar cargas axiales excéntricas y proporcionar una sujeción adecuada, se adhiere a las mordazas dos láminas de caucho con dimensiones de $80 \times 120 \text{ mm}^2$ y 2 mm de grosor. El ensayo se efectúa mediante la aplicación de una carga constante controlado por el desplazamiento a una velocidad 0.2 mm/min. Para la registrar las deformaciones se puede usar un dispositivo LVDT colocado en el centro del espécimen cubriendo aproximadamente 1/3 de la longitud libre entre las mordazas. Otra opción, es utilizar un sensor de análisis óptico 3D para deformación. El ensayo de tracción termina con una pérdida mínima del 70% de la carga máxima y la obtención de la curva trilineal típica de esfuerzo – deformación que se presenta en la Figura 3.22. Durante la primera etapa se observa un comportamiento en el rango elástico sin fisuración de la matriz, por lo que, se puede estimar el módulo elástico de la matriz no agrietada (E_1). La segunda etapa tiene por característica la aparición de la primera

fisuración marcando un punto de transición entre el rango elástico e inelástico (T) generando que disminuya la resistencia y rigidez. Asimismo, la resistencia a la deformación genera la aparición de varias fisuras a lo largo del espécimen, el espaciado y ancho de estas depende del tipo de fibra y espesor del mortero. Por último, la tercera etapa se caracteriza por el esfuerzo de tracción última (f_u) y deformación última (ε_u) además, se observa una matriz completamente agrietada donde la carga de tensión es prácticamente soportada solo por el refuerzo. Por lo cual, se puede estimar el módulo elástico de la matriz agrietada (E_2) (Carozzi et al., 2020; Dey, 2016; Ghiassi et al., 2016).

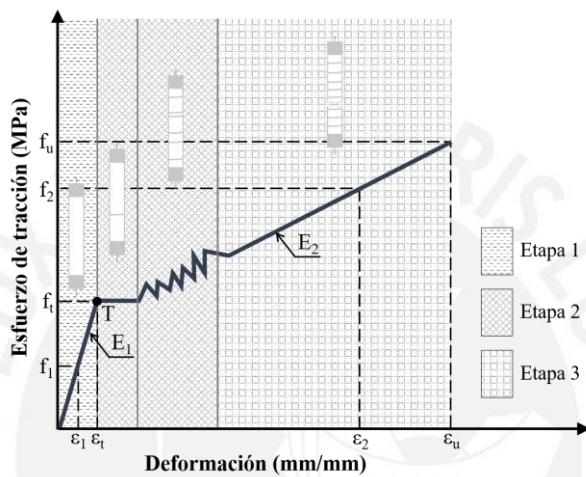


Figura 3.22: Curva típica trilineal del ensayo de tracción

Los esfuerzos de tracción (f_i) en cualquier punto se calculan mediante la ecuación (3.14), donde P_i corresponde a la carga registrada en Newton, A_i es el área del refuerzo por unidad de ancho en mm^2/mm y w_i el ancho del espécimen en mm. Mientras, el módulo de elasticidad se obtiene a partir de la relación entre f_i en MPa y ε_i en mm/mm. Las deformaciones (ε_i) en cualquier punto son determinadas con la ecuación (3.15), donde δ_i corresponde al desplazamiento registrado en mm y L la longitud total de deformación.

$$f_i = \frac{P_i}{A_i \times w_i} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\delta_i}{L} \quad (3.15)$$

3.4.2 Ensayo de flexión en cuatro puntos

El ensayo de flexión en cuatro puntos permite evaluar la capacidad de resistencia a la rotura conferida por la geomalla al mortero al estar sometida la matriz a esfuerzos de flexión (Antunes & Masuero, 2016). El ensayo determina los valores de resistencia a flexión (f_B) y el

módulo de elasticidad de la matriz. Además, se puede identificar como es la unión entre el refuerzo y el mortero a través de los patrones de gritas de la matriz revelando el tipo de falla.

El ensayo se realiza según en base a la Norma ASTM C1341 - 13 (2018) y las recomendaciones de Antunes & Masuero (2016), el espécimen está compuesto por dos capas de los morteros y una capa de refuerzo situada en el centro. Los detalles geométricos y configuración del ensayo se muestra en la Figura 3.23. El espesor de la matriz depende del revestimiento superficial del sistema de albañilería, la Norma NTE E.070 (2006) señala que este varía entre 10 y 20 mm. La fabricación del espécimen sigue lo presentado en la Figura 3.21, a los 28 días de edad se debe ensayar como mínimo 4 espécimen en la máquina de prueba de compresión adaptada (ver Figura 3.23). El ensayo se ejecuta mediante la aplicación de una carga constante de velocidad igual a 0.6 mm/min que se distribuye en los dos polines uniformemente. La prueba continua hasta que se rompa el espécimen o la carga se reduce al 20% de la carga máxima.

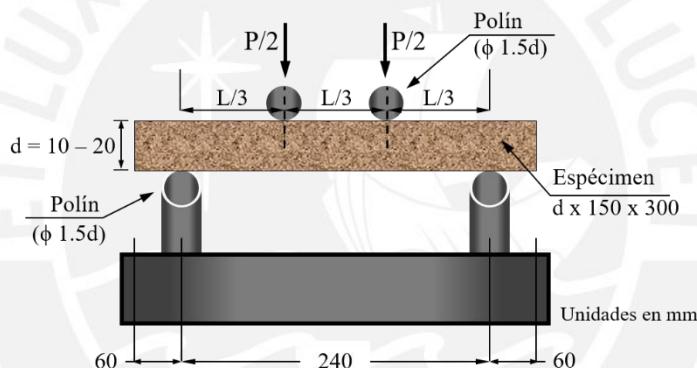


Figura 3.23: Configuración del ensayo de flexión en cuatro puntos

La resistencia a la flexión (f_B) se calcula en MPa utilizando la ecuación (3.16), donde L corresponde a la longitud entre apoyos en mm, P es la carga máxima en Newton, b y d corresponden al ancho y espesor del espécimen, ambos en mm. El módulo de elasticidad (E_B) se determina en MPa utilizando la ecuación (3.17) como una relación entre esfuerzo y desplazamiento ($\Delta f b / \Delta x$) de la parte inicial de la pendiente de la curva.

$$f_B = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.16)$$

$$E_B = \frac{0.21 L^3}{bd^3} \left(\frac{\Delta f b}{\Delta x} \right) \quad (3.17)$$

3.4.3 Ensayo de adherencia

El ensayo de adherencia permite evaluar el rendimiento de corte o adherencia de la matriz aplicada en algún sustrato como los BTC-E. Entre las propiedades mecánicas

resultantes del ensayo se tiene: la resistencia máxima de adherencia, valor asociado a la carga máxima que se transmite del sustrato al refuerzo, el esfuerzo de corte y, los desplazamientos respecto al desplazamiento relativo entre el sustrato y el refuerzo. Asimismo, el ensayo permite identificar diferentes mecanismos de desprendimiento de la matriz, la eficacia de este depende fundamentalmente de la capacidad de adherencia mortero - sustrato y las propiedades mecánicas del mortero y geomalla (Ghiassi et al., 2016).

El ensayo se efectúa según las recomendaciones de RILEM TC 250 como parte del estudio de De Felice et al. (2018) y las indicaciones que sugieren otros autores (Gattesco & Boem, 2017; Ghiassi et al., 2016; Salsavilca et al., 2020). Los especímenes para este ensayo están constituidos por la matriz adherida a una pila de 4 BTC-E (sustrato), cuya relación altura (h) y longitud mínima (t) se encuentra dentro del rango ($h/t = 1.3 - 5$) que sugiere la Norma ASTM C1314 (2018). Los detalles geométricos del espécimen se presentan en la Figura 3.24. La longitud de refuerzo libre considerada es 400 mm, donde 100 mm corresponde a la longitud extra que se incrusta en las mordazas para una correcta distribución de las tensiones. Asimismo, para el área de adherencia se propone un acho (w_b) de 110 mm, que corresponde como mínimo a 3 fibras del refuerzo y una longitud (L_b) igual a 250 mm para asegurar la transferencia de cargar. La longitud libre entre el área adherida y el borde más cercano de la albañilería es 30 mm, mientras los extremos laterales libres del sustrato son de 85 mm, estos con el fin de evitar efectos de borde. En cuanto al espesor de matriz, se considera en función del espesor de revestimiento de un sistema de albañilería.

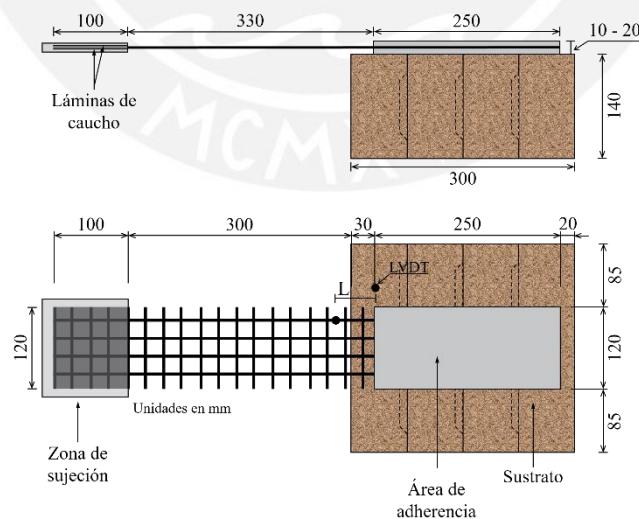


Figura 3.24: Ensayo de adherencia: esquema del espécimen

La fabricación consiste en aplicar la matriz sobre una de las caras del sustrato, previamente limpia y humedecida para evitar que el mortero en estado fresco absorba agua. El proceso es muy similar a lo mostrado en Figura 3.21, solo difieren en que la matriz es

coloca en el área de adherencia. Terminado esto, los especímenes son almacenados en un lugar apropiado hasta la edad de 28 días o más para ser ensayados. Cabe señalar que, se puede aplicar una carga axial menor a 5 MPa durante el curado para conservar la regularidad y linealidad del refuerzo.

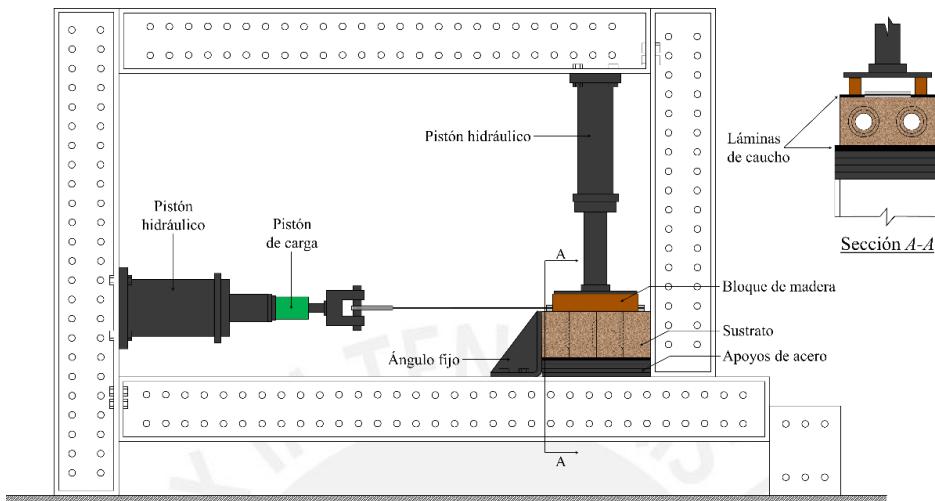


Figura 3.25: Ensayo de adherencia: esquema de instrumentación

El ensayo de adherencia se efectúa mediante un sistema de bloqueo tanto en la parte frontal como superior para evitar el movimiento del sustrato, como se presenta en la Figura 3.25, así se aplica una carga vertical, que depende de la resistencia a compresión de los BTC-E, para prevenir efectos de torsión por parte del sustrato. Cabe indicar que, para que no haya problemas con el bloqueo frontal se cortaron las endentaciones del bloque superior. Durante el ensayo, se debe garantizar la alineación entre la carga aplicada y el plano medio del refuerzo. Asimismo, se sugiere que para evitar cargas axiales excéntricas y proporcionar una sujeción adecuada, la colocación de dos láminas de caucho con dimensiones de 100 x 110 mm² y 2 mm de grosor a las mordazas. El ensayo se efectúa mediante la aplicación de una carga constante controlado por el desplazamiento a una velocidad 0.2 mm/min o menor. Los dispositivos LVDT permitieron registrar los desplazamientos locales (δ_b) en mm, estos fueron colocados como se muestra en la Figura 3.24. A partir de la ejecución del ensayo se obtiene la curva típica de resistencia - deslizamiento que se presenta en la Figura 3.26. La fase 1 es la etapa de respuesta de la matriz polimérica a la adherencia al sustrato presentándose de forma lineal (comportamiento elástico). Luego, la fase 2 es la etapa no lineal antes de alcanzar el máximo esfuerzo de tracción. Por último, la fase 3 consiste en una etapa no lineal después del máximo esfuerzo de tracción, se observa un descenso de esfuerzo con un aumento de deslizamiento.

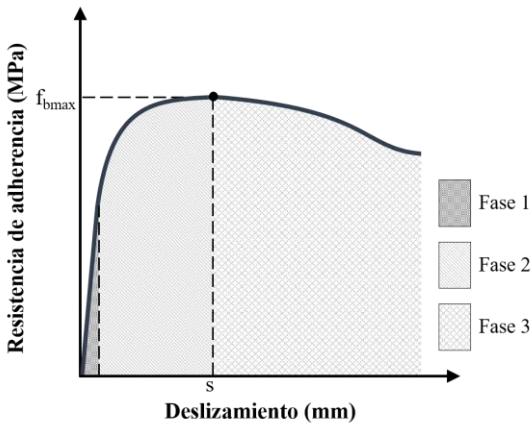


Figura 3.26: Curva típica de esfuerzo - deslizamiento del ensayo de adherencia

La carga máxima alcanzada por unidad de ancho (F_b) se determina como la relación entre la carga registrada (P_b) en Newton y w_b en mm asimismo, la resistencia máxima de adherencia (f_{bmax}) es obtenida dividiendo P_b y el área de sección transversal del refuerzo (A_f) en mm^2 . El valor de A_f corresponde al producto entre el ancho del refuerzo (w_f) en mm y el espesor de la fibra (t_f) paralela a la dirección de carga en mm. También, se calcula el esfuerzo máximo de corte (τ) en la interfaz mediante la ecuación (3.18) y el desplazamiento relativo entre el refuerzo y el sustrato (s) utilizando la ecuación (3.19), donde ε se determina con la ecuación (3.20) y L en mm corresponde a la longitud del LVDT. Cabe resaltar que E_f es el módulo de Young del refuerzo en MPa. Por último, se obtiene el coeficiente de resistencias (η) entre f_{bmax} y resistencia de tracción del refuerzo (f_t) en MPa.

$$\tau = \frac{P_b}{w_b \times L_b} \quad (3.18)$$

$$s = \delta_b - \varepsilon L \quad (3.19)$$

$$\varepsilon = \frac{P_b/A_f}{E_f} \quad (3.20)$$

Por otro lado, como parte de la inspección visual se identifica los mecanismos de desprendimiento. De Felice et al. (2018) y Ghiassi et al., (2016) han establecido seis modos de falla, los cuales de muestran en la Figura 3.27: (I) desprendimiento con fallo cohesivo del sustrato; (II) desadherencia de la interfaz matriz-sustrato o (III) refuerzo-matriz; (IV) deslizamiento del refuerzo dentro de la matriz sin o (V) con agrietamiento de la capa superficial del mortero, finalmente, (VI) falla por tracción del refuerzo fuera del área de contacto.

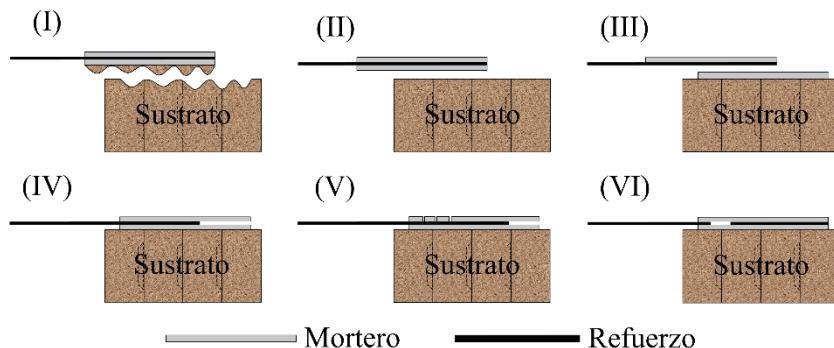


Figura 3.27: Ensayo de adherencia: Mecanismos de desprendimiento (adaptado de Ghiassi et al., 2016)

3.5 Etapa 4: Evaluación del sistema de albañilería reforzada

La metodología concluye con la evaluación del sistema de albañilería reforzada, esta se realiza mediante ensayos por corte cíclico para muros y por cargas sísmicas inducidas en mesa vibratoria para módulos escalados. El análisis del comportamiento permite identificar si el sistema de reforzamiento propuesto proporciona la resistencia necesaria para que las construcciones de tierra posean un mejor desempeño sísmico.

3.4.4 Proceso de construcción del sistema de albañilería de BTC-E reforzado

El proceso de construcción del sistema de albañilería de BTC-E reforzado se basa en el manual presentado por Blondet et al. (2011), consiste en la colocación de la matriz como refuerzo estructural del sistema de albañilería de BTC-E, tal como se muestra en la Figura 3.28. En primer lugar, se limpia y humedece la geomalla del sobrecimiento para eliminar posibles residuos de barro seco. Luego, se coloca la geomalla en las paredes de modo que se envuelva la cara exterior e interior de una sola vuelta. Considerando que la matriz es de 20 mm de espesor, la geomalla se debe encontrar a 10 mm de la superficie de albañilería, para lo cual, se colocan dados de referencia de 10 mm en la cara de la albañilería. La geomalla es fijada por cuerdas que sobresalen del muro de BTC-E, asegurándose en todo momento que se cumpla la linealidad y los 10 mm de separación entre la geomalla y la albañilería. Se debe tener en cuenta que, para cubrir el área del muro es necesario realizar traslapos de 250 mm como mínimo y en las esquinas de 650 mm que luego son tejidas con cuerdas para asegurar la unión. Tras la colocación de la geomalla, se cubren con dos capas de mortero de 10 mm de espesor. Se inicia limpiando y humedeciendo ligeramente la superficial de la albañilería después, se coloca la primera capa de mortero hasta cubrir ligeramente la geomalla y se da una ligera presión de tal manera que la geomalla queda embebida en el mortero.

Inmediatamente después, se coloca la segunda capa de mortero para completar los 20 mm de espesor de la matriz, se empareja y se da el acabado final.

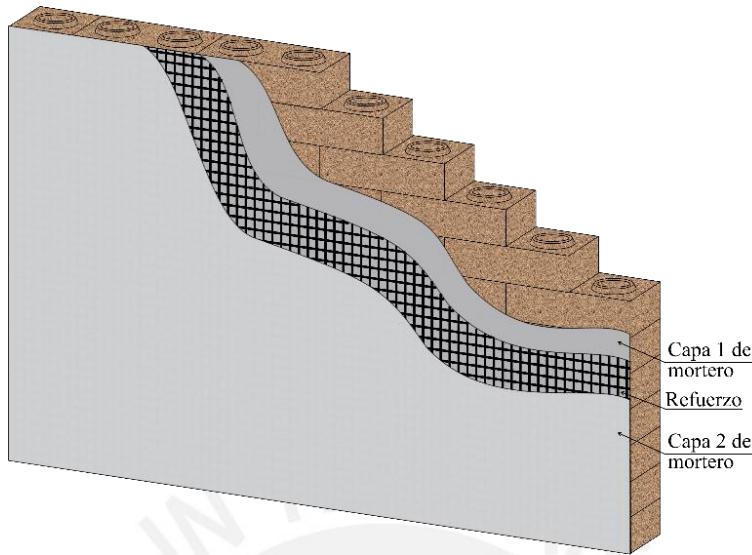


Figura 3.28: Proceso de reforzamiento de la albañilería de BTC-E

3.4.5 Ensayo de compresión diagonal

El ensayo de compresión diagonal se desarrolla para cuantificar la resistencia al corte (f_s) y el módulo rigidez (G_s) de un sistema de albañilería reforzado, pues representa un parámetro importante de evaluación de respuesta estructural ante cargas sísmicas. Asimismo, como parte de la inspección visual se identifica las fallas desarrolladas por el espécimen tras la aplicación de la carga.

El ensayo se realiza en base a los lineamientos indicados en la Norma ASTM E519 (2015), donde se indica que espécimen debe ser compuesto por una matriz de reforzamiento estructural adherida al sistema de albañilería de BTC-E. El murete reforzado de BTC-E posee una forma aproximadamente cuadrada cuyas dimensiones son: 700 mm de altura representado como 9 bloques, 700 mm de ancho que corresponde a 2 bloques y medio y, 140 mm de espesor. Las dimensiones del espécimen son para facilitar la ejecución del ensayo en el laboratorio, pues la Norma ASTM E519 (2015) indica la construcción de muretes de 1200 x 1200 mm². La máquina de ensayo es la de compresión adaptada con cuñas metálicas para distribuir adecuadamente las cargas, además de láminas de madera. Cabe resaltar que, los bloques donde se colocan las cuñas son rellenadas con mortero para evitar que durante el ensayo fallen por aplastamiento, asimismo se debe cortar las endentaciones de la fila superior para asegurar una distribución de cargas uniforme. El ensayo se efectúa mediante la aplicación de una carga constante a una que dependerá de la resistencia a compresión de los BTC-E; no obstante, estudios anteriores recomiendan una velocidad de 0.6 mm/min o 1

kN/min para bloques de tierra (Ribeiro, 2015; Valle, 2019). Los dispositivos LVDT de compresión (LVDT 01) y tracción (LVDT 02) de longitud L en mm son colocados como se muestra en la Figura 3.29. Ribeiro (2015), sugiere detener el ensayo cuando los muretes reforzados alcancen una pérdida mínima de 50% de la carga máxima. A fin de identificar el factor que influye en el comportamiento de la matriz, se recomienda variar la composición del mortero, el tipo de refuerzo o el espesor.

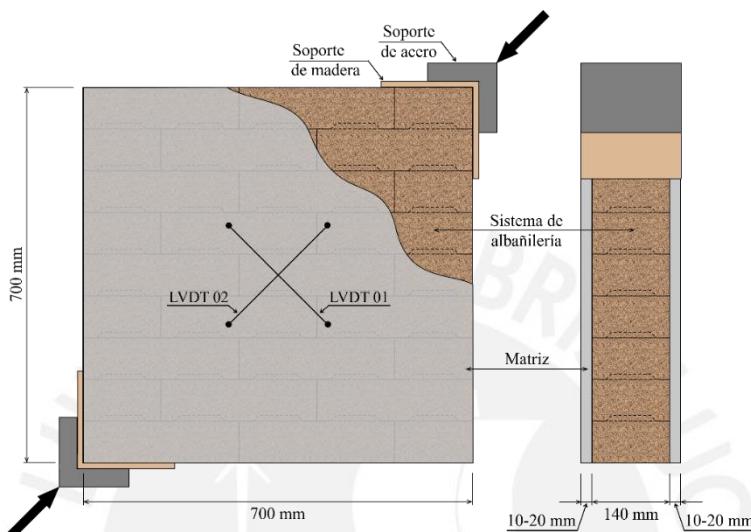


Figura 3.29: Configuración del ensayo de compresión diagonal

La resistencia al corte (f_s) se calcula de acuerdo a la ecuación (3.21), donde P_s es la carga aplicada en Newton y A_s corresponde al área efectiva del murete en mm^2 . Asimismo, el parámetro A_s se determinada según la ecuación (3.22), donde w_s es el ancho, h_s corresponde a la altura y t_s es el espesor del espécimen en mm. Además, el porcentaje de área bruta del bloque (n_s) se obtiene conforme a la ecuación (3.23) expresado en decimales, donde h, b, r son dimensiones del BTC-E en mm. El módulo rigidez (G_s) se evalúa como la relación entre Δf_s en MPa y la deformación angular γ_s en mm/mm determinada de acuerdo a la ecuación (3.24) de un tramo lineal que represente el comportamiento elástico del murete, usualmente, se encuentra comprendido entre el 50% y 20% de la carga máxima. Cabe resaltar que, Δx y Δy se refiere a la extensión horizontal y vertical en mm, respectivamente.

$$f_s = \frac{0.707P_s}{A_s} \quad (3.21)$$

$$A_s = \left(\frac{w_s + h_s}{2} \right) \times t_s \times n_s \quad (3.22)$$

$$n_s = \frac{h \times b - 2\pi r^2}{h \times b} \quad (3.23)$$

$$\gamma_s = \frac{\Delta x + \Delta y}{L} \quad (3.24)$$

3.5.1 Ensayo de corte cílico

El ensayo de corte cílico permite evaluar el desempeño sísmico que aporta la matriz como reforzamiento estructural al sistema de albañilería, de esta manera, se identifica la importancia de reforzar las estructuras de BTC-E en zonas con sismicidad moderada y alta (Qu et al., 2015). Las propiedades mecánicas obtenidas del ensayo son la capacidad de resistencia máxima al corte y a la flexión de las paredes ante cargas laterales. Asimismo, los resultados son evaluados y discutidos en términos de deformación lateral, disipación de energía y degradación de la rigidez del sistema estructural en conjunto (Yacila, Salsavilca, Tarque, & Camata, 2019). Adicionalmente, se identifica patrones de falla por parte del desprendimiento de la matriz, principalmente, como del sistema de albañilería (Bland, 2011).

El ensayo se ejecuta en base a lo indicado en la Norma ASTM E2126 (2019). El espécimen, básicamente, está compuesto por la matriz para reforzamiento adherido a ambas caras del sistema de albañilería de BTC-E. Los muros reforzados tienen dimensiones de 2.10 m de longitud, 2.25 m de altura y 0.28 m de ancho que corresponde a 7.5 bloques de longitud, 30 bloques de altura y 2 bloques de ancho, como se presenta en la Figura 3.30. El patrón de apilamiento de los BTC-E para construir el muro se presenta en la Figura 2.12c y la colocación de la matriz para el reforzamiento en la Figura 3.28. La Norma NTE E.070 (2006) menciona que, los sistemas de albañilería deben contar con un revestimiento mínimo de 10 – 20 mm y en caso de ser del tipo caravista hasta 30 mm. Además, se construye vigas de concreto armado para el soporte y aplicación de las cargas de los muros reforzados de BTC-E, la primera se encuentra fija a la losa de reacción del laboratorio con dimensiones igual a 0.30 x 0.35 x 2.85 m³ y la otra en la parte superior del muro con dimensiones igual a 0.30 x 0.35 x 2.70 m³.

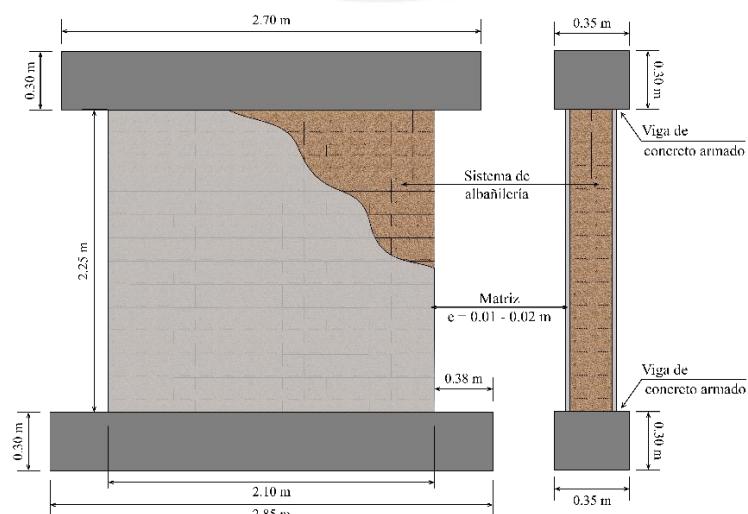


Figura 3.30: Ensayo de corte cílico: esquema del espécimen

El ensayo de corte cíclico se efectúa según la configuración mostrada en Figura 3.31, donde se indica la ubicación de los LVDTs. Los LVDT 01 y 02 son colocados en forma diagonal sobre el muro a fin de medir las deformaciones, mientras los LVDT 03 y 04 de forma vertical en los extremos para medir las deformaciones por la aplicación de cargas verticales y efectos de flexión. Por último, el LVDT 05 se ubica en el centro geométrico entre la viga de confinamiento y el muro de reacción.

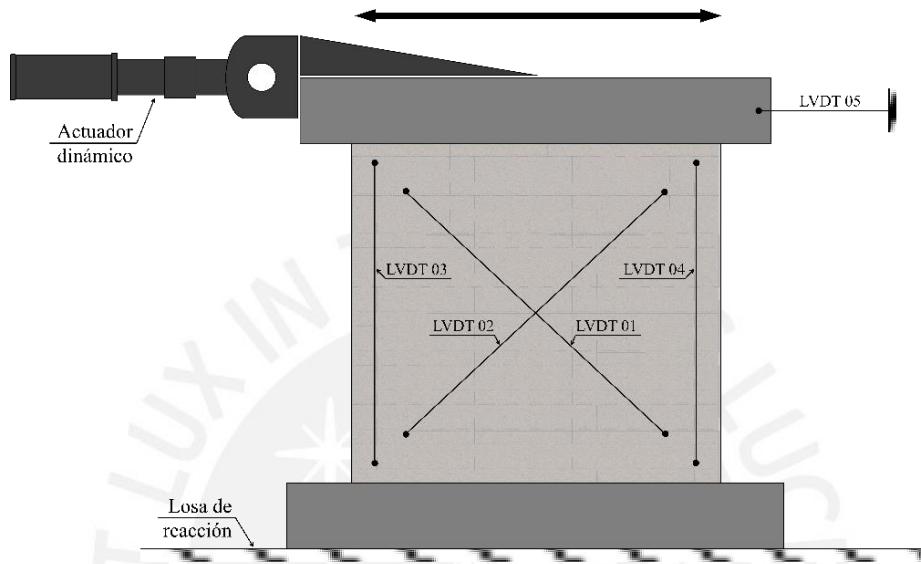


Figura 3.31: Ensayo de corte cíclico: esquema de instrumentación

3.5.2 Ensayo en mesa vibratoria de módulos escalados

El ensayo en mesa vibratoria para módulos escalados se propone como cierre de la metodología, estas pruebas dinámicas identifican el comportamiento sísmico de estructuras de tierra más reales reforzadas sísmicamente. El espécimen de prueba es un módulo de casa de escala igual a 1/3 hasta 1, el módulo está conformado por 4 muros de la albañilería reforzada de baja altura con grosor de doble hilada, el diseño es similar al espécimen propuesto para el ensayo de corte cíclico. Los muros son construidos con unión continua, asimismo la geomalla es colocada empalmada cada 30 cm y cubierta con 20 mm del mortero de tierra estabilizada. El módulo también cuenta con aberturas de puerta y ventanas ubicadas en cada uno de los muros, cubiertos con dinteles de madera del grosor igual a 0.28 m (dos hileras). Se construye un piso o vigas de cimentación de concreto armado adherido a la mesa sísmica sobre el cual se edifica el módulo que permite limitar el deslizamiento del modelo a lo largo de la base (Blondet et al., 2006). Además, se colocó una viga corona de madera para integrar todas las partes (muros y techo) y transferir el peso del techo al resto de la estructura. La instrumentación se coloca como se muestra en la Figura 3.32, consiste en colocar

acelerómetros y transductores de desplazamiento (LVDT) para registrar las deformaciones de la estructura y la mesa, así como la presión diferencial del actuador y aceleración.

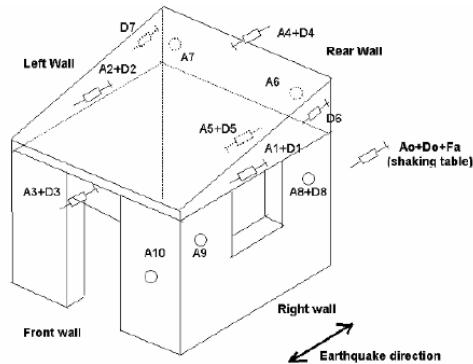


Figura 3.32: Esquema de la instrumentación para el ensayo de módulos en mesa vibratoria (Blondet et al., 2006)

CAPÍTULO 4. CAMPAÑA EXPERIMENTAL PARA LA VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE DESARROLLO DE MORTEROS PARA EL REFORZAMIENTO ESTRUCTURAL

La campaña experimental desarrolla morteros estabilizados para el reforzamiento estructural de sistemas de albañilería de BTC-E, la cual pretende validar las etapas 1 y 2 de la metodología propuesta. La primera etapa incluye la selección del refuerzo superficial y la obtención de sus propiedades mecánicas, asimismo se estudia el suelo SB en base a la caracterización física y el proceso de mejoramiento de su granulometría. Mientras la segunda etapa, consiste en ejecutar ensayos para la caracterización física y mecánica con el fin de obtener morteros óptimos. Luego, se evalúa la durabilidad de estos a través de ensayos que simulan condiciones climáticas.

4.1 Etapa 1: Análisis de la materia prima

4.1.1 Caracterización del suelo SB

El suelo SB en estado natural es del tipo arcilloso procedente del distrito de Carabayllo ubicado en la provincia de Lima, Lima. El suelo SB no presentaba materia orgánica a simple vista, pero sí una cantidad mínima de terrones. Los ensayos para la caracterización física se realizaron a partir de la sectorización equidistante del suelo como se muestra en la Figura 4.1.



Figura 4.1: Extracción de muestras del suelo SB proveniente de Carabayllo

a) Contenido de agua (ASTM D2216, 2019)

El ensayo de contenido de agua (w%) tuvo en consideración la Norma ASTM D2216 (2019). A partir de dos muestras con partículas menores a la malla #4 (4.75 mm), tomadas de cada sección (S-1, S-2, S-3) del suelo SB, se efectuó el ensayo descrito en la Figura 4.2.

Finalizado el ensayo se calculó el contenido de agua como la relación entre el peso del agua y suelo SB seco utilizando las ecuaciones (3.1) y (3.2). De esta manera, se determinó que la humedad natural (w%) del suelo SB fue 2.20 ± 0.42 .



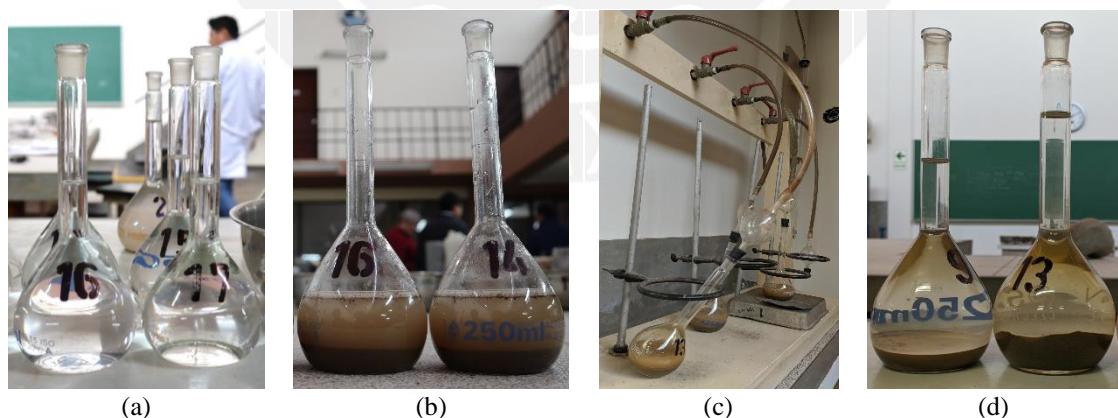
(a)

(b)

Figura 4.2: Ensayo de contenido de humedad: a) Se colocó aproximadamente 100 gr de suelo SB en estado natural en el horno b) 24 horas después se retiró y peso el suelo SB en estado seco

b) Peso específico relativo (ASTM D854, 2014)

El peso específico relativo de los sólidos (G_s) se ejecutó según la Norma ASTM D854 (2014), para el ensayo se tomaron dos muestras de cada sección del suelo SB. En Figura 4.3 se describe cómo se ejecutó el ensayo. Los cálculos se realizaron con las ecuaciones (3.3), (3.4) y (3.5). Respecto al factor de corrección (α) tuvo pequeñas variaciones entre las muestra porque el peso específico del agua es diferente a 1gr/cm³ a temperaturas distintas de 4°C. Así, se obtuvo que el peso específico relativo de los sólidos (G_s) para el suelo SB fue de 2.68 ± 0.02 gr/cm³.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4.3: Ensayo de G_s : a) Los picnómetros son llenados con agua destilada hasta la marca señalada y se registró la masa b) se agregó 40 gr de suelo SB seco y agua destilada hasta cubrir y se dejó reposando por 15 minutos c) se retiró el aire atrapado con la bomba de vacío durante 25 minutos d) se agregó agua destilada hasta la marca y se dejó reposar hasta el día siguiente para pesar

c) Análisis granulométrico (ASTM D7928, 2017)

El ensayo de análisis granulométrico siguió los parámetros indicados en la Norma ASTM D7928 (2017). Las muestras seleccionadas de cada sección del suelo SB tuvieron un peso aproximado de 3 kg con partículas menores a $1\frac{1}{2}$ ", fueron etiquetadas como se muestra en la Figura 4.4 para ser llevadas al horno por 16 horas. Después de este tiempo, las muestras fueron tamizadas por malla #10 y separadas en dos porciones: gravas y finos correspondientes al material retenido y pasante de la malla #10.

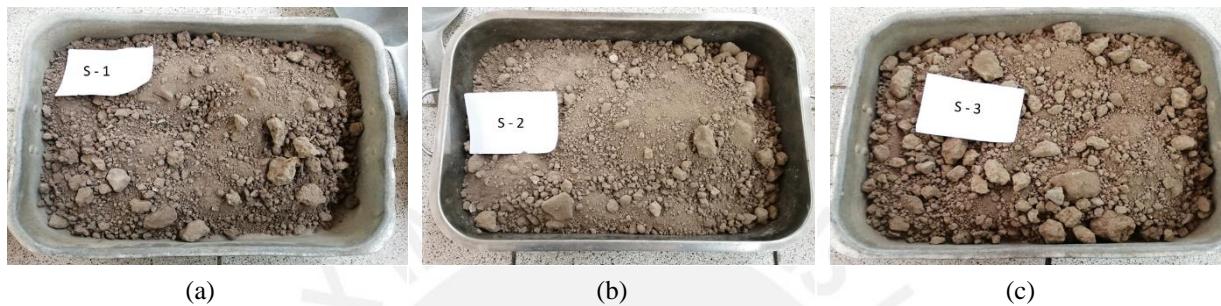


Figura 4.4: Muestras para el análisis granulométrico a) S-1, b) S-2 y c) S-3 extraídas del suelo SB

La distribución de los tamaños se realizó a través de dos técnicas: la fracción más gruesa (gravas) por tamizado del suelo en estado seco y la fracción más fina (finos) mediante el análisis hidrométrico. La técnica de tamizado inició con el lavado del material retenido en la malla #10 para eliminar las partículas finas adheridas a las partículas de grava, luego fueron colocadas al horno por 16 horas para secar. Tras este tiempo, las muestras fueron tamizadas utilizando mallas correspondientes que se muestran en la Figura 4.5a, cada retenido fue pesado. Para el material pasante de la malla #10, se toma 200 gr de cada muestra y se lavan usando la malla #200 hasta que el agua que escurra sea lo más transparente posible, luego se secan en el horno por 16 horas. Por último, se retiran del horno y se tamizan por las mallas a partir de la #10 hasta la #200 tal como se muestra en la Figura 4.5b, cada fracción obtenida fue pesada. Por otro lado, la técnica del análisis hidrométrico consistió en tomar 65 gr del material que pasa la malla #10 de cada muestra del suelo SB, y colocarlos por 16 horas en recipientes con 125 mL de una solución al 4% en peso de Hexametafosfato de Sodio (agente dispersante). Pasado este período, se dispersó muy bien la mezcla de cada recipiente con ayuda de la batidora por un minuto exacto como se observa en la Figura 4.5c. Estas fueron transferidas a los cilindros de sedimentación, los cuales fueron completados hasta 1000 mL con agua destilada (ver Figura 4.5d). Se colocan tapones de goma cubriendo el extremo abierto y se agitan durante 30 segundos para completar la dispersión de las mezclas. Las lecturas con el hidrómetro se realiza cada cierto intervalo de tiempo (1, 2, 3, 4,

8, 15, 30, 60, 120, 240, 1440 minutos), para lo cual se inserta el hidrómetro en la mezcla y se deja suspendido hasta que se estabilice como lo muestra la Figura 4.5e. Asimismo, se preparó un cilindro con 1000 mL de agua destilada y de agente dispersante en la misma proporción para obtener las correcciones del hidrómetro y medir la temperatura. Luego de tomar la última lectura, los contenidos de cada cilindro fueron lavados por la malla #200 hasta que el agua que escurra salga lo más transparente posible, tras esto se continua con el mismo procedimiento de tamizado para la porción que pasa la malla #10.

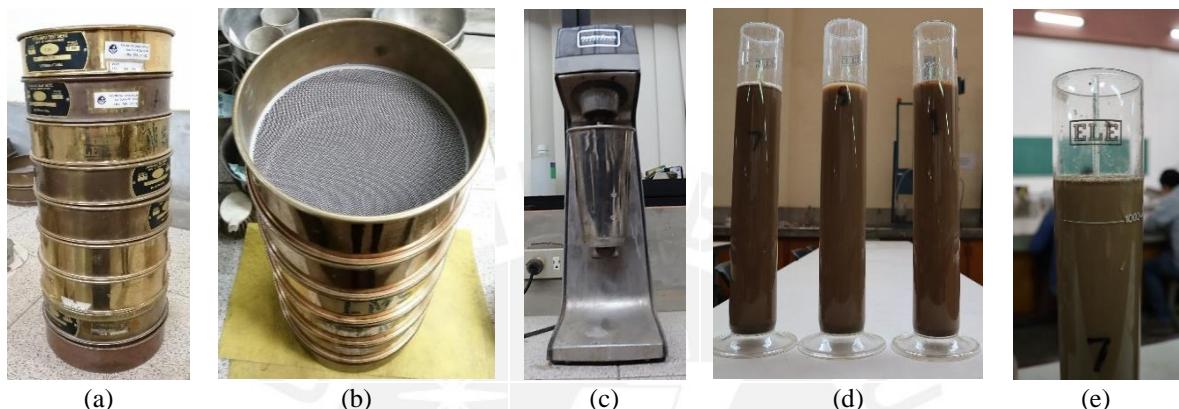


Figura 4.5: Ensayo de análisis granulométrico: a) mallas utilizadas para las gravas y b) los finos. b) Dispersión de los finos con hexametafosfato de sodio y agua destilada con la batidora d) Cilindro de sedimentación que contiene los finos en hexametafosfato de sodio y agua destilada e) lecturas con el hidrómetro

La Norma ARS 681 (1996) presenta husos granulométricos que limitan la composición del suelo SB con la finalidad de que el suelo SMM posea una composición más fina que permita fabricar morteros resistentes y compatibles con las unidades de BTC-E. La Figura 4.6 muestra la envolvente de las curvas granulométricas del suelo SB comparada con los husos granulométricos que propone la norma.

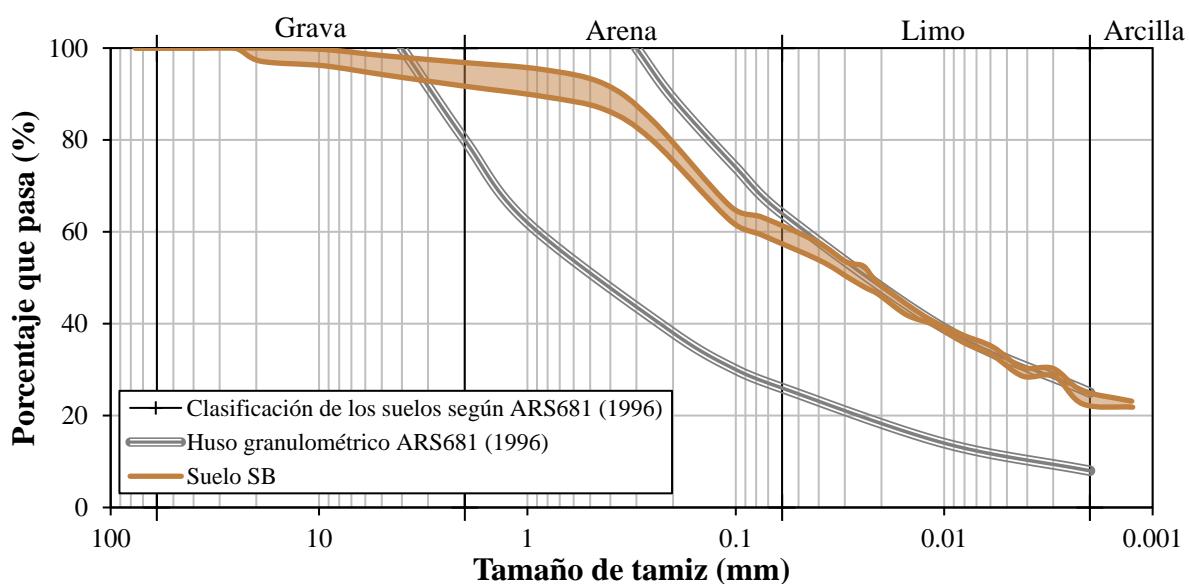


Figura 4.6: Envolvente granulométrica del suelo SB y husos granulométricos según la Norma ARS 681 (1996)

d) Límites de Attemberg (ASTM D4318, 2017)

Los límites de Attemberg se ejecuta siguiendo los lineamientos de la Norma ASTM D4318 (2017), se seleccionaron tres muestras de cada sección (S-1, S-2, S-3) del suelo SB con partículas menores a la malla #40. El ensayo inicia con la preparación del espécimen que consiste en tomar una porción del suelo SB tamizado y agregarle agua destilada hasta conseguir una pasta uniforme. Para el límite líquido, se colocó la pasta en la Cuchara de Casagrande y se trazó una ranura tal cual se presenta en la Figura 4.7a. Luego, se giró la manivela de la Cuchara hasta que la ranura se cierre 13 mm (ver Figura 4.7b), se registra el número de golpes. Por último, se tomó una muestra del ancho del ranurador de la zona donde cerró la pasta, para colocarla en cápsulas y ser llevadas al horno por 24 horas. En cuanto al límite plástico, se tomó una mínima cantidad de pasta para formar rollitos delgados tal cual se observa en la Figura 4.7c. Al conseguir este diámetro, se divide los rollitos en dos porciones para ser colocadas en cápsulas de secado por 24 h. Finalmente, se determinó que el límite líquido y plástico del suelo SB fue 25.7% y 17.3% respectivamente.

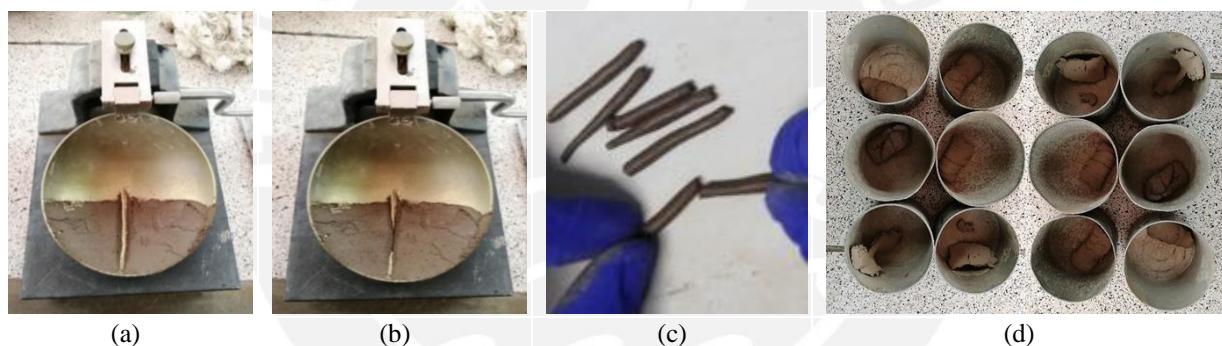


Figura 4.7: Ensayo de límite líquido: a) Porción de muestra en la Cuchara de Casagrande dividida mediante un ranurador b) Porción de muestra unida mediante el golpeteo continuo de la cuchara. c) Ensayo de límite plástico: formación de un rollito de 3.2 mm de diámetro. d) Despues de los ensayos, las muestras se colocan en cápsulas para ser secadas en el horno

e) Ensayo de XRF

Adicionalmente, a los ensayos de caracterización física se realiza ensayos de caracterización química con el fin de conocer la composición iónica del suelo SB y determinar los tipos de arcillas que presenta el material. La composición química del suelo SB se obtiene por medio del análisis de espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF) a través de un espectrómetro ARL OPTIM'X. Los resultados presentados en la Tabla 4.1 permiten considerar al suelo SB como un material de construcción. El alto contenido de SiO_2 (58.58%) y Al_2O_3 (15.61%) indican la presencia de arcillas illitas y caolinitas, respectivamente (Janik, Skjemstand, & Raven, 1995). Estos tipos de arcillas presentan poca

expansión, como se indican en la Figura 2.6; por lo que, el suelo SB estaría apto para la fabricación de mortero.

Tabla 4.1: Composición química del suelo SB por espectroscopía de fluorescencia de rayos X

Material	Contenido de óxido (w/w%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	CaO	Na ₂ O	LOI
Suelo SB	58.58	15.61	6.41	1.99	2.49	4.06	2.07	6.92

LOI: Loss on ignition

4.1.2 Mejoramiento de las propiedades físicas del suelo SB

Los resultados de la caracterización física del suelo SB se presentan en resumen en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resultados de la caracterización física del suelo SB

Ensayo	Norma	Resultado
Contenido de agua	ASTM D2216 (2019)	2.20 %
Límite líquido	ASTM D4318 (2017)	25.7%
Límite plástico	ASTM D4318 (2017)	17.3%
Índice de plasticidad	ASTM D4318 (2017)	8.4%
Peso específico	ASTM D854 (2014)	2.68 gr/cm ³

El resultado obtenido del ensayo granulométrico verificó que la curva de distribución del suelo SB no se encuentra dentro del Huso propuesto por la norma (ver Figura 4.6), por tanto, este tiene que ser mejorado. El proceso de mejoramiento consistió en optimizar las propiedades físicas del suelo SB, añadiendo una cierta cantidad de agregado fino, con el objetivo de conseguir un suelo idóneo para la fabricación del mortero. Así, el suelo mejorado (SMM) está compuesto por 10% de arena gruesa, 20% de arena fina y 70% de suelo SB tamizados por la malla #10 evitando partículas superiores a 2 mm. La envolvente granulométrica del suelo mejorado se muestra figura 4.8 y los resultados de plasticidad en la Tabla 4.4.

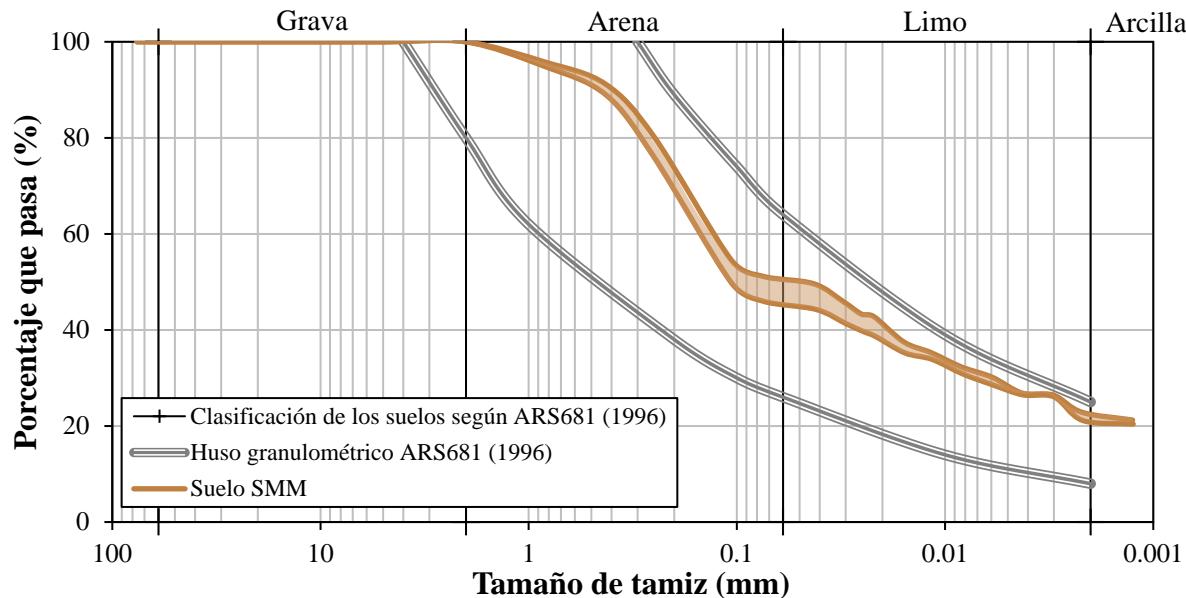


Figura 4.8: Envolvente granulométrica del suelo SMM y husos granulométricos de la Norma ARS 681 (1996)

Tabla 4.3: Composición granulométrica del suelo SB y SMM

Suelo	Grava y Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)
SB	57-100	21-57	21-25
SMM	45-100	20-50	20-22

Tabla 4.4: Límites de consistencia del suelo SMM

Ensayo	Norma	Resultado
Límite líquido	ASTM D4318 (2017)	19.4%
Índice de plasticidad	ASTM D4318 (2017)	5.8%

El suelo SMM es el idóneo para la fabricación de morteros, pues se verifica que la curva se encuentra dentro de los husos recomendados por la norma correspondiente. Además, cumple con las normativas indicadas en la Tabla 3.1 que indica cómo debería ser la composición granulométrica del suelo para ser considerado material de construcción. Cabe resaltar que se recomienda una granulometría dentro de los husos considerando la composición granulométrica de la Tabla 3.1, puesto que, en la mayoría de los casos se presentan resultados satisfactorios.

4.1.3 Geomalla

La metodología presentada describe como se debe realizar la selección de la geomalla a partir del elemento estructural que se desea reforzar, en este caso, el elemento soporta cargas en dos direcciones dentro de un mismo plano. Por esta razón, se sugiere la utilización de geomallas del tipo biaxial que son capaces de soportar cargas de tracción en la dirección

longitudinal y transversal. Entre las geomallas del tipo biaxial presentadas en la Tabla 3.3, resaltan las fabricadas a base de polipropileno cuyas propiedades mecánicas son mejores en comparación a los otros polímeros. Por la compatibilidad con el mortero, las propiedades mecánicas, la durabilidad y asequibilidad económica, se ha optado por utilizar la geomalla biaxial Tensar BX-1100. Las características mecánicas se indican en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5: Propiedades mecánicas de la geomalla biaxial Tensar BX 1100

Propiedades	Unidades	BX 1100	
		MD	XMD
Tamaño de abertura	mm	25.00	33.00
Espesor mínimo de la costilla	mm	0.76	0.76
Resistencia a la tracción al 2% de elongación	kN/m	4.10	6.60
Resistencia a la tracción al 5% de elongación	kN/m	8.50	13.40
Resistencia última a la tracción	kN/m	12.40	19.00

- MD es la dirección principal de la geomalla (dirección de extrusión de la maquina) y XMD es la dirección transversal.
- Valores mostrados son calculado como valor promedio menos dos veces la desviación estándar de un numero de ensayos.

4.2 Etapa 2: Obtención del mortero estabilizado y evaluación de la durabilidad

4.2.1 Descripción de materiales

Los materiales empleados para la fabricación de los morteros son el suelo SMM y los estabilizantes. El cemento utilizado para la estabilización pertenece a la marca SOL Tipo I, la cual cumple con la normativa peruana NTP.334 (2016) y ASTM C150 (2020). Este cemento es fabricado a base de clinker y yeso, y son envasados en bolsas impermeables de 42.5 kg (UNACEM, 2012). Mientras, la cal hidratada de gravedad específica de 2.15 g/cm^3 fue de la marca MYCAL, formada por trazas hidróxido de calcio con un mínimo de hidratación de 90%, carbonato de calcio, 20% mínimo de cal útil de óxido de calcio y partículas de rocas disgregadas, normalmente es comercializada en bolsas de 40 kg (MYCAL, 2021).

4.2.2 Proceso de estabilización química

El proceso de estabilización consistió en dos fases: la primera se utilizó 10% y la segunda 20% de estabilizante respecto del peso de los sólidos. Para la primera fase se prepararon 3 dosificaciones de morteros: de control y estabilizado con cemento y cemento-cal, denominados S, SC10 (100%) y SCL10 (50%) respectivamente. Estas tuvieron como parámetro variable la trabajabilidad y adherencia a los BTC-E en función a la cantidad de agua, se prepararon varias mezclas para determinar el porcentaje óptimo de agua mediante el ensayo de esparcimiento. Asimismo, cada mezcla es colocada en los BTC-E a fin de

establecer si existe adherencia y compatibilidad entre estos dos, además que no se evidencie formación de grietas por contracción de secado. Una vez determinado el contenido óptimo de agua se fabricaron muestras cúbicas de los morteros S, SC10 (100%) y SCL10 (50%) para conocer la resistencia a compresión uniaxial a 7, 14, 21 y 28 días. Los resultados indicaron que no cumplía la resistencia mínima exigida, por lo que, se decidió aumentar la cantidad de estabilizante a 20% respecto de los sólidos. El proceso de estabilización para la segunda fase fue similar a la primera, en este caso se prepararon tres dosificaciones de mortero: estabilizado con cemento SC20 (100%), y con cemento y cal SCL20 (50%) y SCL20 (75%). Las denominaciones de S son referidas al mortero de control, mientras las SC y SCL a los morteros estabilizados con cemento y cemento – cal, respectivamente. Los valores de 10 y 20 que van seguidos de estas letras, indican la cantidad de estabilizante presente en la mezcla respecto del peso de los sólidos. Los porcentajes entre paréntesis señalan la cantidad de cemento que posee la estabilización, para morteros estabilizados solo con cemento este valor será 100%, mientras para los estabilizados con cemento – cal puede variar entre 50 – 75%. En la Tabla 4.6 se presentan las dosificaciones empleadas para cada mortero mencionado.

Tabla 4.6: Formulación de las dosificaciones

Grupo	Designación del mortero	Suelo (%)	Estabilizante*		Relación agua/material seco (%)
			Cemento (%)	Cal hidratada (%)	
Control (S)	S	100	-	-	24.0
Suelo con cemento (SC)	SC10 (100%)	90	10	-	28.2
	SC20 (100%)	80	20	-	27.4
Suelo con cemento - cal (SCL)	SCL10 (50%)	90	5	5	30.7
	SCL20 (50%)	80	10	10	31.6
	SCL20 (75%)	80	15	5	29.0

*Respecto del peso de los sólidos

4.2.3 Proceso de producción del mortero

El proceso de producción de los morteros fue tal cual se presenta en el subcapítulo 3.3.1. Básicamente, se inicia con el mezclado de los materiales según las dosificaciones propuestas, luego se debe colocar la mezcla en el molde correspondiente para cada ensayo. Continúa el curado que consiste en colocar las muestras moldeadas en un lugar apropiado

cubiertos con un plástico azul para mantenerlas húmedas durante 24 – 48 horas dependiendo si se encuentran aptos o no para ser desmoldadas. Después de este periodo, se desmoldan, etiquetan y almacenan hasta alcanzar la edad necesaria para el ensayo. El proceso de producción de los morteros termina cuando el número de muestras en estado fresco y estado es cubierto.

4.2.4 Caracterización física y mecánica del mortero

A partir de las dosificaciones propuestas se fabrican morteros con y sin estabilizantes, tanto en estado fresco como endurecido. De esta manera, las mezclas son caracterizadas físicamente para determinar el contenido óptimo de agua por medio del ensayo de esparcimiento; mientras los especímenes cúbicos y prismático, mecánicamente, a través de ensayos de compresión y flexión en tres puntos para definir el contenido de estabilizantes

a) Ensayo de esparcimiento (ASTM C203, 2017)

El ensayo de esparcimiento siguió la Norma ASTM C203 (2017), se evaluó la trabajabilidad de un total de 20 mezclas para 5 dosificaciones de cada grupo de los morteros estabilizados SC y SCL, siendo la variable la cantidad de agua utilizada. Mediante el parámetro variable agua/material seco se midió la capacidad de esparcimiento del mortero (ver Figura 4.9). Adicionalmente, se hizo un análisis de opinión del operador sobre la consistencia de la mezcla y la adherencia de este en BTC-E.



Figura 4.9: Esparcimiento del mortero en la mesa de flujo: a) vista frontal y b) vista superior

El ensayo de esparcimiento es considerado como el más confiable para evaluar la trabajabilidad del mortero, pues permite identificar un rango de valores de relación agua/material seco (Gomes et al., 2012b). La capacidad de esparcimiento medida de las dosificaciones de los morteros SC y SCL se muestran en la Figura 4.10, estas poseen valores de esparcimiento entre 150 – 240 mm y 180 – 225 mm respectivamente. Estos rangos son considerados por investigaciones presentadas en la Tabla 3.4 como bueno y excelente en

términos de adherencia asimismo, desde el punto de vista del operador se corroboró esto. Adicionalmente, durante el ensayo, el operador calificó la consistencia de las mezclas en cuatro rangos: seca, adecuada, fluida y muy fluida. Se observa que ninguna de las dosificaciones propuestas tenía una consistencia seca, por lo que, no hubo dificultad para poder trabajar con ellas. Al estar relacionada directamente la trabajabilidad a la consistencia del mortero, se puede deducir que si la consistencia de la mezcla es más fluida también será más trabajable. La Figura 4.10 presenta las curvas de trabajabilidad de los morteros estabilizados, con líneas rojas se indica la relación agua/ material seco óptima para cada la formulación de los grupos SC y SCL presentadas en la Tabla 4.6.

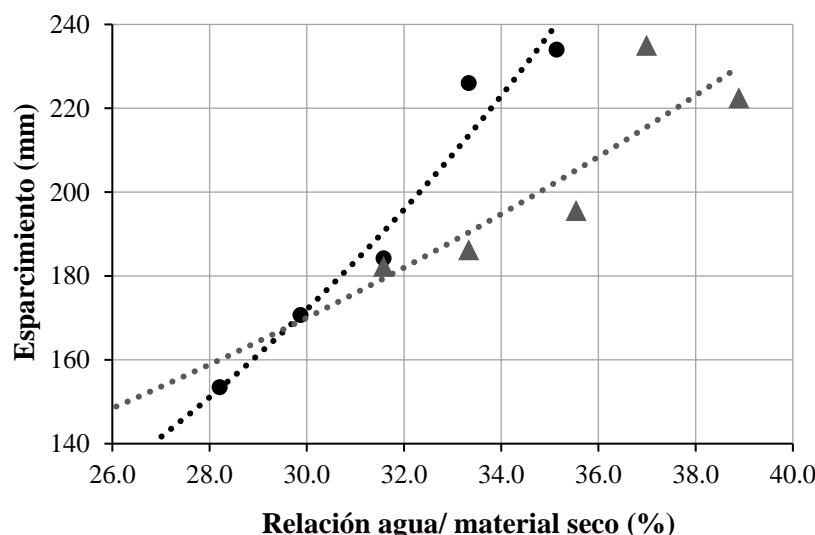


Figura 4.10: Capacidad de espaciado de los morteros estabilizados y la relación de la consistencia en base a la opinión del operador

b) Ensayo de compresión uniaxial (ASTM C109, 2020)

El ensayo de compresión uniaxial se realizó según la metodología presentada en el capítulo anterior para evaluar la resistencia a compresión de seis morteros: S, SC10 (100%), SCL10 (50%), SC20 (100%), SCL20 (75%) y SCL20 (50%). La máquina de prueba utilizada para realizar el ensayo fue la MTS modelo Exceed 45.105 (ver Figura 4.11a) con aplicación de carga constante controlado por el desplazamiento a una velocidad 1 mm/min. A fin de comprender la evolución de resistencia de los morteros, se ensayaron de 4 - 8 muestra cúbicas de 50 mm a 7, 14, 21 y 28 días de edad por cada dosificación.

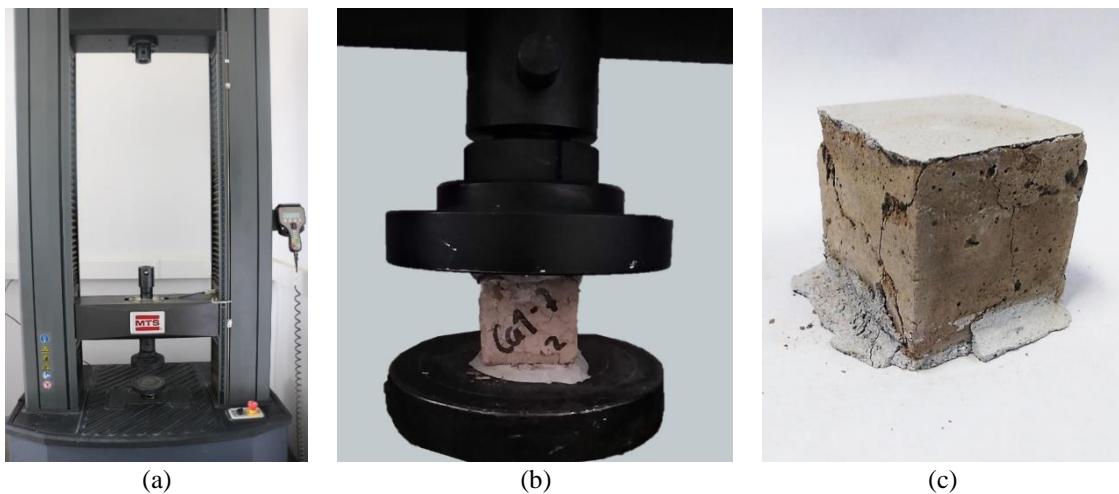


Figura 4.11: Ensayo de compresión uniaxial: a) Maquina de prueba, b) ejecución del ensayo y c) espécimen ensayado

El ensayo se realizó con el objetivo de determinar el contenido óptimo de estabilizante para los morteros de tierra, lo cual se logró en dos fases de estabilización. Para establecer una diferencia entre los morteros sin y con estabilizantes, se fabricó un mortero de control que no contiene estabilizante nombrado mortero S. La fase inicial comprendió la estabilización al 10% respecto de los sólidos, se fabricó muestras cúbicas con 10% de cemento, al cual se denominó mortero SC10 (100%). Además, se consideró la sustitución del cemento por cal hasta un 50% respecto a la estabilización, las muestras se etiquetaron como SCL10 (50%). La segunda fase de estabilización se limitó a utilizar 20% de estabilizante respecto del peso seco. Se elaboró muestras cúbicas estabilizadas con 20% de cemento denominadas SC20 (100%) y sustituidas por cal, hasta un 25% y 50% respecto de la estabilización, SCL20 (75%) y SCL20 (50%) respectivamente.

La Figura 4.12 muestra que la densidad de los morteros estabilizados es menor respecto a la de control S, dando a entender que los morteros de revestimiento son más ligeros siendo conveniente si se busca un mortero para reforzamiento estructural. Asimismo, se observa que mientras menor sea la cantidad cementante presente en la mezcla, los morteros son más ligeros. Por último, se verifica que, al transcurrir de los días, el peso específico de las muestras disminuye porque el agua capilar es utilizada para hidratar las partículas ligantes del mortero.

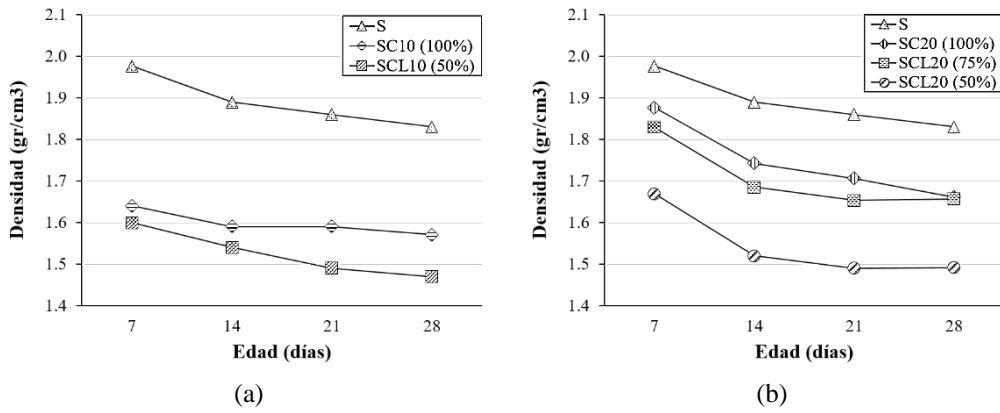


Figura 4.12: Evolución de la densidad de los morteros de tierra a) con 10% y b) con 20% de estabilizante

Respecto a la fase inicial, la Figura 4.13 muestra que la resistencia a la compresión de los morteros S, SC10 (100%) y SCL10 (50%) a siete días es 1.13 MPa (CV 5.7%), 1.50 MPa (CV 3.0%) y 0.64 MPa (CV 8.4%) respectivamente. Desde esta edad, se puede determinar que los morteros no alcanzarán una resistencia mínima (RC min) de 3 MPa; se toma este límite pues se busca un mortero de resistencia compatible con los muros construidos y ese valor corresponde a la resistencia mínima proporcionada por los BTCs a los 28 días de edad. Cabe resaltar que, la resistencia a compresión obtenida a los siete días representa alrededor del 70% de la resistencia adquirida a los veintiocho días. A los veintiocho días de edad se pudo corroborar que los morteros S, SC10 (100%) y SCL10 (50%) solo alcanzan valores de resistencia a la compresión igual a 1.74 MPa (CV 10.3%), 2.08 MPa (CV 0.7%) y 0.76 MPa (CV 5.4%) respectivamente. Esta situación motivó a realizar una segunda fase de estabilización aumentando la cantidad de estabilizante a 20% respecto de los sólidos. También se muestra una evolución ascendente de la resistencia a medida que pasan los días de secado, se evidencia que existe un bajo crecimiento entre los veintiún y veintiocho días de edad siendo este valor alrededor del 5%.

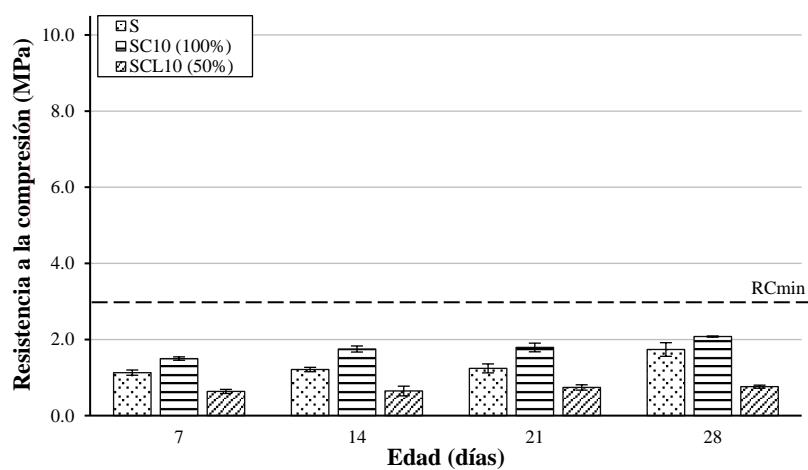


Figura 4.13: Evolución de la resistencia a compresión de los morteros estabilizados al 10% (fase 1)

En cuanto a la segunda fase, el análisis se realiza de manera similar a la anterior, la Figura 4.14 presenta que la resistencia a la compresión de los morteros S, SC20 (100%), SCL20 (75%) y SCL20 (50%) a siete días es 1.13 MPa (CV 5.7%), 7.35 MPa (CV 4.4%), 5.82 (CV 4.2%) y 1.44 MPa (CV 5.7%) respectivamente. Se identifica que los morteros S y SCL25 (50%) no superan la resistencia mínima de 3 MPa comprobándose que a veintiocho días solo alcanzan resistencias de 1.74 MPa (CV 10.3%) y 2.16 MPa (CV 13.9%). Mientras que, los morteros SC20 (100%) y SCL20 (75%) superan la resistencia mínima especificada, adquiriendo resistencias a veintiocho días de 9.84 MPa (CV 2.6%) y 6.78 MPa (CV 6.1%), en el mismo orden. Con estos resultados, se puede considerar a estos dos como los morteros de estabilización óptima para la matriz de reforzamiento estructural. Adicionalmente, los resultados obtenidos revelan una evolución ascendente de la resistencia a compresión mientras pasan los días de secado.

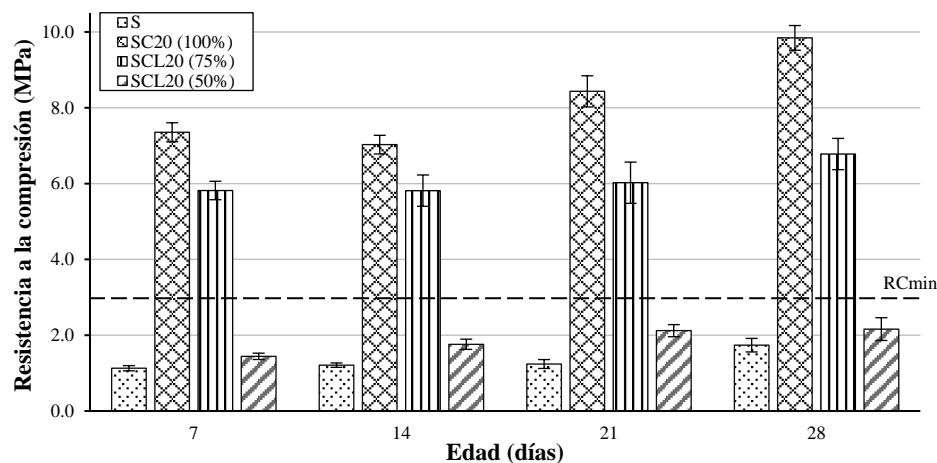


Figura 4.14: Evolución de la resistencia a compresión de los morteros estabilizados al 20% (fase 2)

Finalmente, se demuestra que el ensayo se ejecutó de manera adecuada al adquirir resistencias a compresión con buena presión reflejado en el bajo coeficiente de variabilidad; aun cuando algunas muestras presentan una variabilidad mayor al 10% siendo la mayor dispersión de los resultados 0.13.

c) Ensayo de flexión en tres puntos (ASTM C348, 2020)

El ensayo de flexión en tres puntos se efectuó de acuerdo a la metodología presentada en el capítulo anterior, para lo cual se determinó la resistencia a la flexión de tres dosificaciones: S, SC20 (100%) y SCL20 (75%). Estos son conocidos como morteros de dosificación óptima al presentar una adecuada trabajabilidad y buena resistencia de compresión, por ende, a esfuerzos de flexión. La máquina de prueba utilizada para realizar el

ensayo fue la MTS modelo Exceed 45.105 adaptada con una plataforma (ver Figura 4.15a) para aplicar una carga constante controlada por el desplazamiento a una velocidad 0.3 mm/min. A fin de comprender la evolución de resistencia de los morteros, se ensayaron de 4 – 8 muestras prismáticas de 40 x 40 x 160 mm a 7, 14, 21 y 28 días por cada dosificación (ver Figura 4.15b).



Figura 4.15: Ensayo de flexión en tres puntos: a) Maquina de prueba adaptada y b) el espécimen después del ensayo

La Figura 4.16 muestra los resultados obtenidos del ensayo. El esfuerzo de flexión a siete días de los morteros S, SC20 (100%) y SCL20 (75%) es 0.18 MPa (CV 9.8%), 1.79 MPa (CV 4.3%) y 1.47 MPa (CV 2.0%) respectivamente. Los morteros han alcanzado un esfuerzo mínimo (RF min) de 0.75 MPa similar a que alcanzan BTCs a los 56 días de edad, se toma este limitante pues se busca un mortero compatible con los muros construidos con BTCl-E. Es así que el esfuerzo a flexión alcanzada a los veintiocho días para los morteros S, SC20 (100%) y SCL20 (75%) es 1.10 MPa (CV 6.3%), 2.28 MPa (CV 2.8%) y 2.02 MPa (CV 9.6%) respectivamente, se espera tener un crecimiento del esfuerzo mientras mayor sea la edad del mortero. Asimismo, es importante mencionar que la ruptura de la muestra se consiguió en el rango de 30 – 90 segundos definido por la norma asociada.

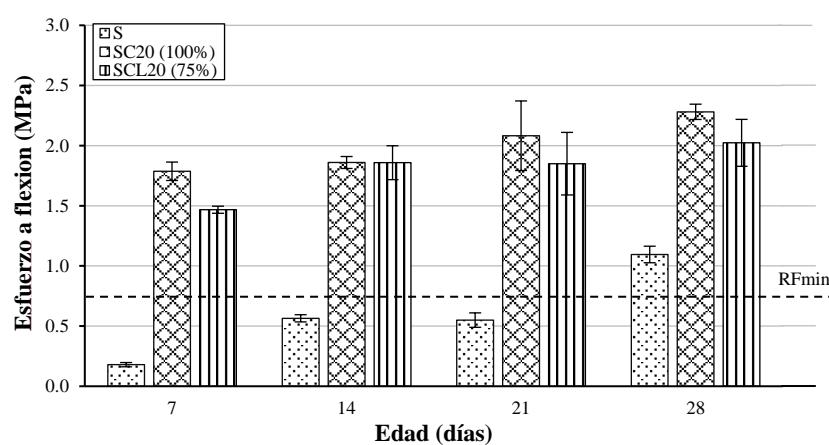


Figura 4.16: Evolución del esfuerzo a flexión de los morteros óptimos estabilizados al 20%

En cuanto a la relación de los ensayos, presentado en la Figura 4.17, se observa una buena correlación lineal ($R^2 = 0.8948$) entre la resistencia de compresión y el esfuerzo de flexión, esto permite realizar ensayos de compresión uniaxial y esperar tener buenos resultados durante el ensayo de flexión en tres puntos, comprobándose lo mencionado por Gomes et al. (2017).

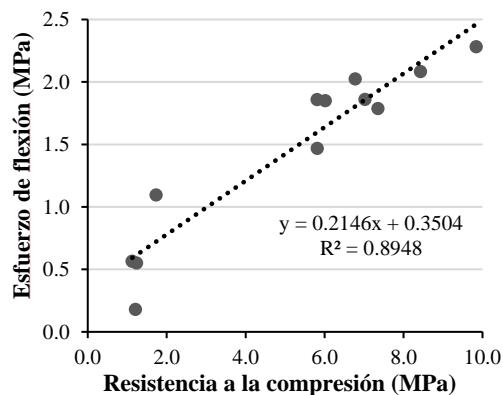


Figura 4.17: Correlación entre la resistencia a compresión y el esfuerzo a flexión

4.2.5 Evaluación de la durabilidad del mortero

Los materiales de construcción basados en tierra son porosos presentando una reducida durabilidad al estar expuestas al agua, por ello, es importante considerar los ensayos de permeabilidad, absorción y erosión para el presente estudio. Los especímenes de morteros utilizados para la evaluación de la durabilidad varían dependiendo del ensayo que se realice, así se presenta la Figura 4.7 donde se especifica las dimensiones y geometría de estos. La variabilidad dimensional y geométrica de los especímenes se debe a que cada ensayo evalúa un área de exposición diferente al agua. Asimismo, se ha considerado espesores de 10 y 20 mm para los ensayos de erosión pues se busca definir el grosor de la matriz de reforzamiento estructural.

Tabla 4.7: Especímenes de mortero considerados para los ensayos de durabilidad

Espécimen	Dimensiones (mm)	Geometría	Tipo de ensayo
Prismático	100 x 55 x 10		Permeabilidad por ángulo de contacto
Cúbico	50 x 50 x 50		Absorción por capilaridad
			Absorción por capilaridad
Prismático	200 x 100 x 10		Erosión por goteo
	200 x 100 x 20		
Prismático	250 x 250 x 10		Erosión acelerada
	250 x 250 x 20		

a) Ensayos de permeabilidad por gota (Yuan, Y. & Lee, T.R., 2013)

El ensayo de permeabilidad se realizó según la metodología presentada en el capítulo anterior para determinar la permeabilidad de los morteros óptimos: S, SC20 (100%) y SCL20 (75%). La evaluación cualitativa mide el ángulo de contacto (θ°), formado por la tangente de la gota de agua y la superficie horizontal de la muestra, para clasificar al material como hidrofóbico o hidrofílico. La medición se hizo a partir de fotografías digitales tomadas en cuatro tiempos, a 0 s, 15 s, 5 min y 15 min, inmediatamente después del primer contacto entre la gota y la superficie del espécimen. La gota es dejada caer desde una altura de 20 mm por encima de la superficie ensayada, tal cual se observa en la Figura 4.18, por un gotero de 1.0 mm de diámetro interno. Se ensayaron cerca de 20 muestras prismática como las presentadas en la Tabla 4.7 de 28 días de edad, como mínimo, por cada dosificación.

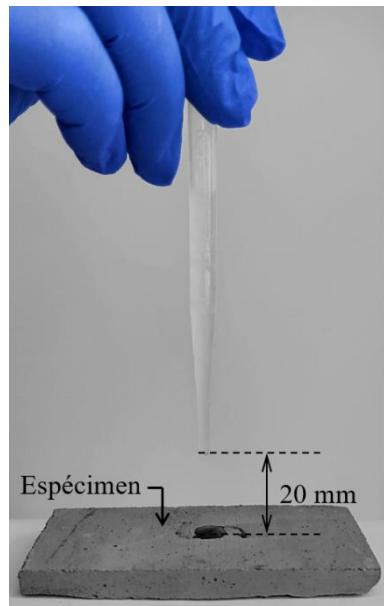


Figura 4.18: Ejecución del ensayo de permeabilidad

Las fotografías adquiridas fueron procesadas a través del software ImageJ para obtener el ángulo de contacto (θ°), los resultados obtenidos para los morteros S, SC20 (100%) y SCL20 (75%) se presentan en la Figura 4.19. Los resultados de permeabilidad muestran que los morteros S son hidrofílicos al tener un ángulo de contacto promedio de 34.4° mientras, los morteros estabilizados SC20 (100%) y SCL20 (75%) son hidrofóbicos con ángulos de 105.9° y 96.5° respectivamente. Asimismo, los morteros estabilizados con el tiempo llegan absorberse en su totalidad o mantenerse con un ángulo menor a la inicial, a diferencia de los morteros S que después de los 5 segundos, la gota es absorbida rápidamente, lo que limita continuar con la medición. Esta situación es esperada considerando que los materiales de tierra son porosos con un alto ratio de absorción (Aguilar et al., 2016). Por otra parte, a partir de las muestras analizadas de los morteros estabilizados, se ha encontrado una disminución del paulatina del ángulo presentándose dos casos a los 15 minutos. Como se observa en la Figura 4.19, para los morteros SC20 (100%) se ha determinado que alcanzado este tiempo la gota es absorbida o puede mantenerse con un ángulo menor al inicial pero mayor a 90° , conservando la condición hidrofóbica. En tanto, para los morteros SCL20 (100%) se ha encontrado que llegado los 15 minutos la gota es absorbida o se mantiene un ángulo menor a 90° , cambiando a un estado hidrofílico para este tiempo. También, es importante resaltar que, para concentraciones altas de cemento, morteros SC20 (100%), los ángulos de contacto son mayores en comparación al mortero SCL20(75%) que son ligeramente más bajos. Esta reducción del ángulo se podría atribuirse a que la porosidad es mayor al ser, los morteros

SCL20 (75%), de menor densidad que los SC20 (100%), estabilización conocida como hidrofóbica (Kebao & Kagi, 2012).

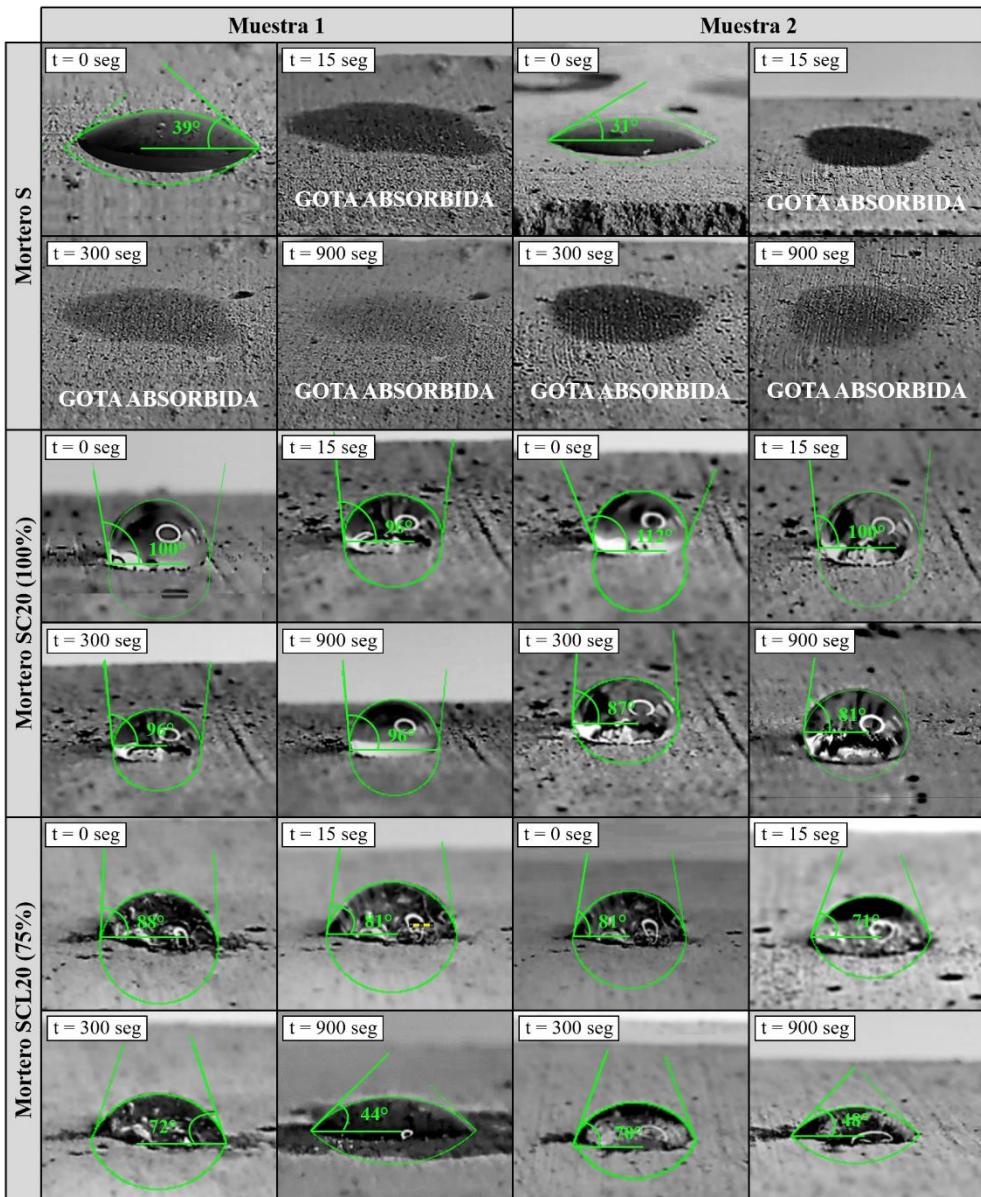


Figura 4.19: Resultados de permeabilidad de los especímenes de morteros óptimos

b) Ensayos de absorción por capilaridad (UNE EN 1015-18, 2003)

El ensayo de absorción por capilaridad se efectuó siguiendo la metodología presentada en el capítulo anterior con el fin de evaluar la velocidad de absorción de agua, a través de la succión capilar, de los morteros óptimos S, SC20 (100%) y SCL20 (75%). Los resultados son expresados en curvas de absorción por capilaridad que representan la cantidad de agua absorbida por unidad de área en contacto (kg/m^2) en función de la raíz cuadrada del tiempo ($\text{min}^{0.5}$). La pendiente del segmento lineal más significativo de la curva representa el

coeficiente absorción capilar inicial (CC). Se ensayaron 6 muestras cúbicas de 50 mm a 28 días de edad por cada dosificación durante 24 horas.

Los resultados demostraron que existe una notoria diferencia entre los especímenes sin y con estabilizante, la Figura 4.20 presenta de manera independiente las curvas obtenidas para el mortero de control S y los estabilizados. En primer lugar, se observa que la curva obtenida para el mortero S decrece por debajo del valor inicial, esto se debe a que los especímenes mientras absorbían agua también perdían material provocando que el ensayo termine a los 30 minutos. Por el contrario, las curvas de los morteros estabilizados a medida que avanza el tiempo absorben agua gradualmente hasta 9.43 kg/m² y 11.44 kg/m² para los morteros SC20 (100%) y SCL20 (75%) respectivamente. Observando las curvas de absorción capilar en la Figura 4.20, es notorio que el mortero S no presenta una tendencia lineal (exponencial) durante los primeros minutos, luego la absorción capilar se torna directamente proporcional al tiempo. Este comportamiento anómalo se suprime al estabilizar, probablemente al no producirse la hinchazón de la arcilla al primer contacto con el agua; puesto que, ya no se genera la reducción del tamaño de los poros ni aumenta la presencia de poros capilares activos (Gomes, Gonçalves, & Faria, 2016). También, se puede identificar el momento en que el agua alcanza el extremo opuesto a la cara ensayada, representado como la parte de la curva que se transforma en una línea horizontal. Entonces, el momento en que se produce esto es a los 30 minutos para los especímenes S y a las 5 horas para los SC20 (100%) y SCL20 (75%), marcando el periodo final de absorción capilar gradual estable. Los coeficientes de absorción CC obtenidos mediante el análisis de regresión lineal confirman la fiabilidad del ensayo ($R > 0.95$). Las pendientes del primer tramo lineal recto de estas curvas establecen que los valores de CC son -12.55 kg/(m².min^{1/2}), 0.50 kg/(m².min^{1/2}) y 0.77 kg/(m².min^{1/2}) para los morteros S, SC20 (100%) y SCL20 (75%) respectivamente. Las tasas de absorción adquiridas demuestran que la disminución de la concentración del cemento genera un incremento de la absorción de agua. Se presume que, la porosidad aumenta por la menor presencia de partículas de arcilla cementadas, lo que incrementa el agua disponible para las arcillas sin cementar así tienen mayor humedad para expandirse (Uzoegbo, 2016). Los valores de CC de los morteros estabilizados son aceptables por la humectabilidad capilar presentada, estudios previos obtuvieron valores similares al de esta investigación (Gomes et al., 2017).

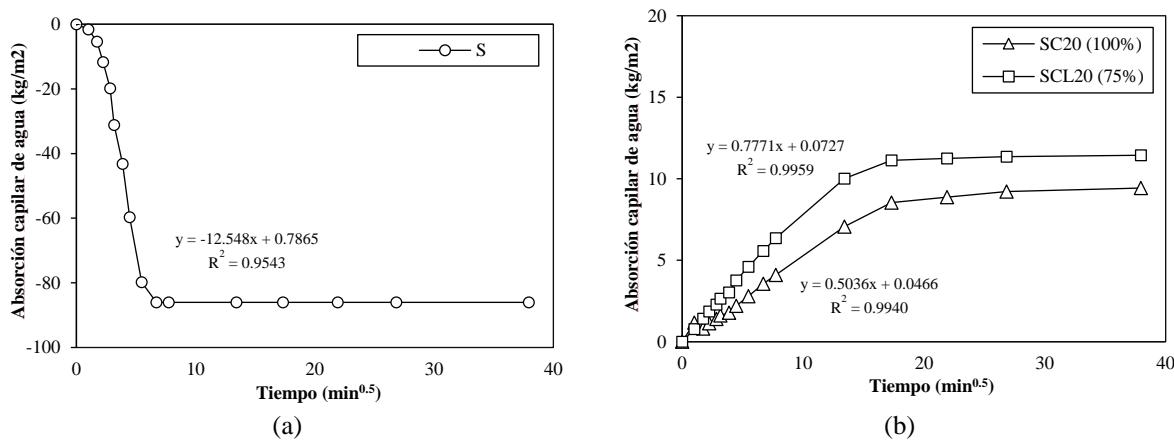


Figura 4.20: Curvas de absorción capilar de agua para los morteros a) sin y b) con estabilizante

Respecto a los morteros S, se sabe que el agua es causante de la inevitable degradación total de estos, por la baja resistencia al agua que ofrecen, produciéndose en un corto tiempo debido a la rápida captación de agua. En la Figura 4.21 se presenta el estado de los especímenes para las tres dosificaciones transcurrido 5 minutos de iniciar el ensayo. Se puede observar que para este tiempo los especímenes de mortero S han perdido material en la cara de contacto con el agua mientras, los especímenes estabilizadas presentan un ascenso del agua por capilaridad.

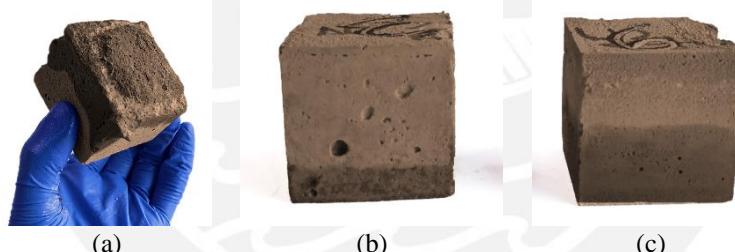


Figura 4.21: Despues de 5 minutos de iniciado el ensayo: a) mortero S y morteros estabilizados b) SC20 (100%) y c) SCL20 (75%)

c) Ensayo de absorción total (ASTM C67, 2020)

El ensayo de absorción total se ejecutó siguiendo la metodología descrita en el capítulo anterior con el objetivo de determinar la capacidad máxima de absorción de agua de los morteros óptimos S, SC20 (100%) y SCL20 (75%). Los resultados son presentados en curvas de absorción que indican la cantidad de agua absorbida respecto al peso seco del espécimen. Así, se ensayaron 6 especímenes cúbicos de 50 mm a 28 días de edad por cada dosificación durante 24 horas.

La propiedad de absorción total del agua permite verificar el volumen total de vacíos de los especímenes de mortero (Izemmouren et al., 2015). Como resultados se presentan las curvas de los morteros estabilizados SC20 (100%) y SCL20 (75%) en la Figura 4.22. La

curva del mortero S no se muestra debido a que estos especímenes no resistieron a la sumersión total degradándose totalmente a los 10 minutos de iniciado el ensayo, como se observa en la Figura 4.23, debido a la rápida absorción del agua. Las curvas de absorción total en la Figura 4.22 demuestran que el factor de absorción de agua aumenta cuando el contenido de material cementante es menor. Los morteros SC20 (100%) y SCL20 (75%) alcanzan valores de 11.1% y 22.6%, respectivamente, a las 24 horas de iniciado el ensayo. Probablemente, el incremento de absorción es porque el agua disponible para los minerales de arcillas sin cementar es mayor ocasionando la expansión de estas partículas lo que aumenta la porosidad (Kinuthia, 2015). Cabe resaltar que, los valores de absorción son coherentes con los resultados obtenidos de resistencia a la compresión pues, al ser el mortero SC20 (100%) de mayor resistencia tienden a tener baja capacidad de absorción de agua (Medvey & Dobszay, 2020). En base a la normativa presentada en la Tabla 3.5 el mortero SCL20 (75%) no cumple con los criterios de evaluación que indican que no se debe superar el 15% de absorción total de agua, por lo que, es considerada de resistencia moderada frente al agua (Esteve, 2016).

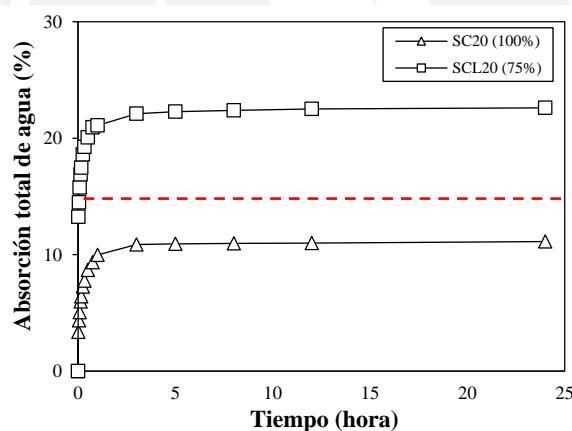


Figura 4.22: Curvas de absorción total de agua para los morteros estabilizante

Como se mencionó, los especímenes de morteros S experimentan una rápida degradación del material en corto tiempo por la baja resistencia al agua que ofrecen. En la Figura 4.23 se presenta el estado de los especímenes para las tres dosificaciones transcurrido 10 minutos de iniciar el ensayo. Para este tiempo, los especímenes de mortero S o han sido consumidos totalmente o se mantienen tal cual la Figura 4.23a.

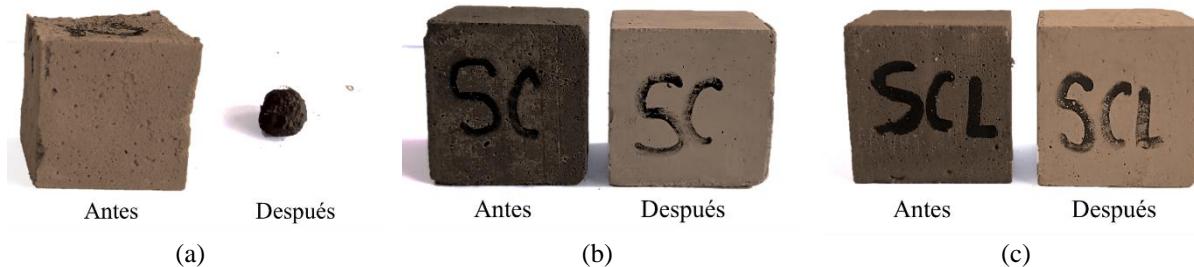


Figura 4.23: Despues de 10 minutos de iniciado el ensayo: a) mortero S y morteros estabilizados b) SC20 (100%) y c) SCL20 (75%)

d) Ensayos de erosión por goteo (NZS 4298, 2020)

El ensayo de erosión por goteo se efectúa de acuerdo a la metodología expuesta en el capítulo anterior con el fin de evaluar el daño que sufren los sistemas de reforzamiento cuando están expuestos a lluvias. Este simula las gotas de lluvia combinando la capacidad absorción de agua en el impacto local, y el efecto del viento dado por el ángulo de impacto, el cual indica una intensidad de lluvia moderada (García-Vera & Lanzón, 2018; Heathcote, 1995). La ejecución del ensayo se llevó a cabo de acuerdo a Figura 4.24, se ensayaron a los 28 días especímenes de los morteros óptimos S, SC20 (100%) y SCL20 (75%) de 10 mm y 20 mm de espesor (ver Tabla 4.7). Los resultados son expresados como la profundidad de erosión media en el espécimen para un tiempo máximo de 60 minutos.

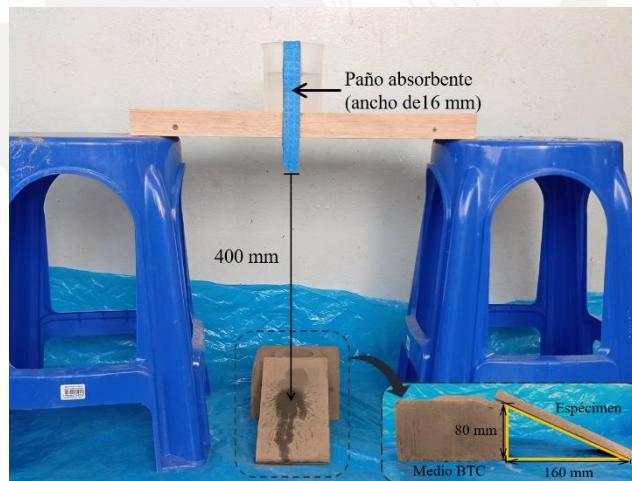


Figura 4.24: Ejecución del ensayo de erosión por goteo: detalle de espécimen

Los resultados de erosión evidencian que los morteros S de control son especímenes que no resisten al ataque del agua pues, tras 3 minutos de goteo constante estos han perdido la forma y el daño es notorio, de 3 - 4 mm de erosión para los especímenes de 10 mm (S - 10) y 20 mm (S - 20) de espesor. Después de 26 y 40 minutos, el agua ha logrado desintegrar las muestras S - 10 y S - 20 respectivamente, siendo considerada una erosión media de 10 mm y 20 mm en el mismo orden. Asimismo, para este tiempo, los especímenes han absorbido tal

cantidad de agua generando que la cohesión entre las partículas de arcilla se pierda causando la ruptura de las fuerzas de enlace de estas y el desprendimiento de una parte del espécimen como se observa en la Figura 4.25. No obstante, Kinuthia (2015) y Lima et al. (2020), mencionan que el desprendimiento no se debe a la erosión provocada por la caída directa de la gota sobre el espécimen, sino al escurrimiento que se produce en la parte inferior de la muestra por la erosión hídrica. Por otro lado, los morteros estabilizados no manifiestan ningún tipo de erosión hasta el término del ensayo (60 minutos) como se aprecia en la Figura 4.25 para los especímenes SC20 (100%) y SCL20(75%). Este comportamiento es esperado por los resultados obtenido anteriormente a partir de los ensayos de permeabilidad y absorción. La concentración de cemento, densidad, el agua disponible para los minerales de arcillas sin cementar, las características propias de las arcillas (si son expansivas) y la composición del suelo son factores que influyen en la porosidad y resistencia de estos materiales al agua. Además, Heathcote (1995) indica que una dosificación con 1% de cemento, como estabilizante, empieza a presentar estabilidad frente a la erosión.

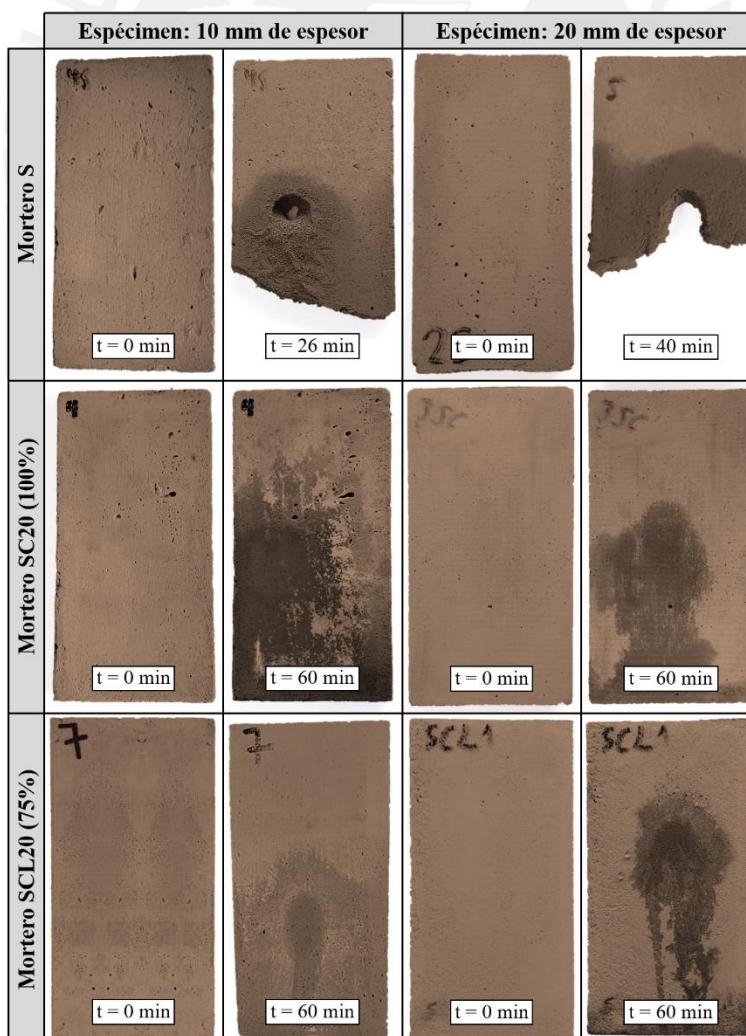


Figura 4.25: Resultados de erosión por goteo de los especímenes de morteros óptimos

En la metodología del capítulo 3 se da a conocer la Tabla 3.6 correspondiente a la escala de evaluación de erosionabilidad por goteo para bloques de tierra de espesor igual a 125 mm; por lo que, se ha escalado los valores para presentar la Tabla 4.8 equivalente para especímenes de espesor de 10 mm y 20 mm. En base a estos rangos se determina que los morteros S son muy erosivos considerándolos no apto para la construcción en zonas de lluvia moderada. Mientras, los morteros SC20 (100%) y SCL20 (75%) al tener profundidad de erosión 0 mm son evaluados como no erosivos y aptos para la construcción.

Tabla 4.8: Índice de erosionabilidad propuesto para el ensayo de erosión por goteo

Índice de erosionabilidad	Profundidad (mm)		Resultados
	Espesor 10 mm	Espesor 20 mm	
1	0	0	No erosivo (A)
2	$0 < D \leq 1.0$	$0 < D \leq 2.0$	Poco erosivo (A)
3	$1.0 < D \leq 1.5$	$2.0 < D \leq 3.0$	Erosivo (A)
4	$1.5 \leq D$	$3.0 \leq D$	Muy erosivo (NA)

*(A) Apto y (NA) No apto

e) Erosión por acelerada (NZS 4298, 2020)

El ensayo de erosión acelerada se efectúa acorde a la metodología del capítulo 3 a fin de estimar el daño que pueden sufrir los sistemas de reforzamiento al estar propensos a lluvias torrenciales en zonas de lluvias moderadas (Stazi et al., 2016). Este ensayo imita al efecto de las lluvias desde el impacto local hasta el comportamiento del viento, cuando la energía de liberación de gotas de lluvia es máxima, lo cual se da cuando el ángulo de impacto es 90° (Heathcote, 1995). La realización del ensayo se presenta en la Figura 4.26, se utilizó el equipo de simulación de lluvias con sistema de agua recirculante y especímenes de los morteros óptimos S, SC20 (100%) y SCL20 (75%) de 20 mm de espesor con edades mayores a 28 días (ver Tabla 4.7). El equipo consta de una salida de agua en forma de espray a presión estable controlada por el manómetro ubicado en la entrada de la salida (ver Figura 4.26b). El tipo de liberación de agua permite simular precipitaciones de intensidad moderada sobre un determinado área (diámetro de 150 mm) como se observa en la Figura 4.26c. Respecto al espécimen, se ubica a una distancia de 470 mm de la salida de agua y la presión establecida es de 1.5 bares para los morteros S y 2.5 bares para los estabilizados. Los resultados son expresados como la profundidad de erosión media en el espécimen para un tiempo máximo de 60 minutos.

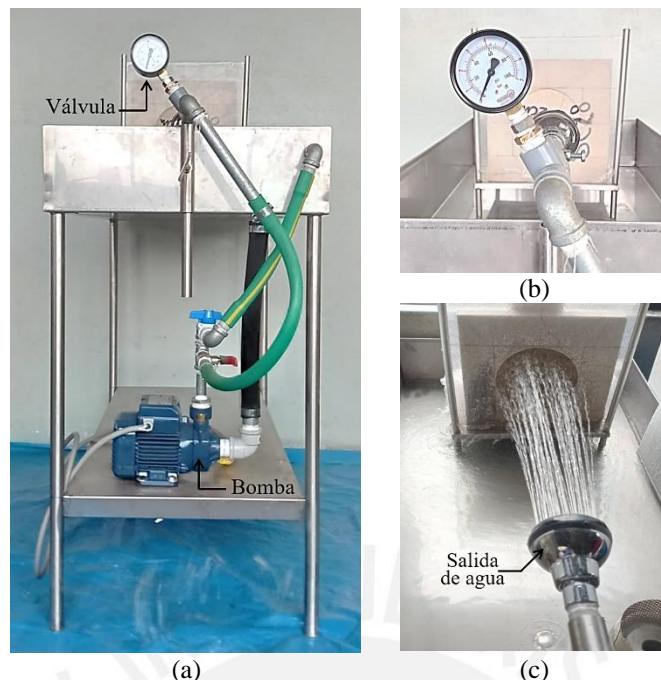


Figura 4.26: Ensayo de erosión acelerada: a) Equipo de simulación de lluvias con sistema recirculante, b) manómetro de 100 psi que regula la presión y c) salida de agua

Los resultados de las pruebas de erosión acelerada en morteros S de control fueron los esperados dada la falta de resistencia al agua de este tipo de materiales. Así, demostraron que después de los 5 minutos de erosión, el daño es importante y el espécimen ha perdido forma, la profundidad de erosión es 5.7 mm que conforma cerca del 25% del espesor del espécimen. A los 12 minutos, la erosión hídrica ha logrado desintegrar gran parte de los especímenes causando la fractura de este y el fin del ensayo, la profundidad final de erosión registrada fue de 14.5 mm que corresponde aproximadamente al 70% del espesor inicial; por esta razón, Heathcote (1995) considera que el ensayo es severo para evaluar la erosión por agua de lluvias (Nakamatsu et al., 2017). En contraste, los morteros estabilizados SC20 (100%) y SCL20 (75%) no evidencian ningún tipo de deterioro por erosión tras los 60 minutos que duró el ensayo como se observa en la Figura 4.27. Cabe mencionar que, a pesar de aumentar la presión de salida de agua, con la intención de producir una condición más severa de erosión, no se evidencio ningún tipo de daño. El accionar se atribuye a la presencia de cemento en la dosificación, como se sabe este material brinda estabilidad frente a la erosión a partir del 1%. Por consiguiente, los morteros SC20 (100%) muestran mayor resistencia a la penetración de agua alcanzando ingresar solo un 10.9 mm frente a los morteros SCL20 (75%) que llegan a entrar 15.2 mm al tener una menor concentración de cemento. Los resultados son los esperados por la falta de cohesión que han presentado las partículas de arcillas en los ensayos anteriores, tanto el de permeabilidad y absorción como el de erosión por goteo.

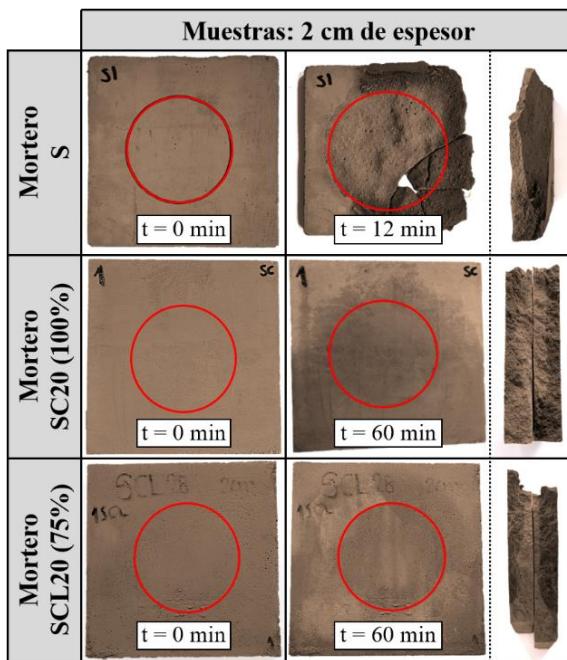


Figura 4.27: Resultados de erosión acelerada de los especímenes de morteros óptimos

En el capítulo 3, como parte de la metodología, se muestra la Tabla 3.7 para establecer la escala de evaluación de erosionabilidad por erosión acelerada. La Norma NZS 4298 (2020) indica que los rangos dispuestos son para bloques de tierra de espesor igual a 125 mm; por lo tanto, los valores se escalaron para presentar la Tabla 4.9 correspondiente a especímenes de espesor igual a 20 mm. De esta manera, conforme a la Tabla 4.9, los morteros S son muy erosivos al tener una profundidad de erosión igual a 14.5 mm, siendo no considerados como material apto para la construcción en zonas con precipitaciones menores a 500 mm. Por otro lado, los morteros SC20 (100%) y SCL20 (75%) al no presentar erosión son clasificados como no erosivos y aptos para la construcción.

Tabla 4.9: Índice de erosionabilidad propuesto para el ensayo de erosión acelerada

Índice de erosionabilidad	Profundidad (mm)	Resultados
	Espesor 20 mm	
1	$0 \leq d < 3.0$	No erosivo
2	$3.0 \leq d < 8.0$	Poco erosivo
3	$8.0 \leq d < 14.5$	Erosivo
4	$14.5 \leq d < 19.0$	Muy erosivo
5	$19.0 \leq d$	Falla

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

En esta investigación se ha propuesto la metodología para la caracterización mecánica de sistemas de reforzamiento para construcciones de albañilería con bloques estabilizados de tierra comprimida (BTC-E), aportando al desarrollo de sistemas constructivos alternativos en países sísmicos. El desarrollo de las conclusiones del presente trabajo se aborda respecto a dos principales aspectos, la metodología para la caracterización mecánica de sistemas de reforzamiento y la validación de esta a partir de la ejecución de una campaña experimental.

Metodología para la evaluación de la durabilidad y la caracterización mecánica del refuerzo estructural

La metodología está dirigida tanto a la matriz de reforzamiento, incluyendo mortero y refuerzo, como esta aplicada en los sistemas de albañilería de BTC-E. De esta manera, se estableció un procedimiento para la producción de mortero que sea compatible con el sistema y resistente frente a la erosión por agua. Se definió para la primera parte estudiar los materiales correspondientes a la fabricación de morteros, es decir el suelo y los estabilizantes, a través de ensayos para caracterización física, química, mineralógica. Estos permiten conocer las propiedades físicas, la composición iónica y determinar el tipo de arcilla presente en el suelo, importantes parámetros para la determinación de un suelo no expansivo y estabilizantes compatibles con el material. Además de ensayos para caracterización física y mecánica del mortero, a fin de determinar un contenido óptimo de agua que ofrezca trabajabilidad adecuada y asegure la compatibilidad del mortero – albañilería de BTC-E. También, una cantidad óptima de estabilizante que resista lo suficiente para cumplir con la resistencia mínima (3 MPa) establecida de acuerdo a la albañilería BTC-E. Para la segunda parte, se presentó una serie de ensayos que evalúan la permeabilidad, absorción y erosión de los morteros óptimos frente al agua. Se recopiló y adaptó, de la normativa internacional, criterios de evaluación que condicionan al material como hidrófobo o hidrófilo, contenido máximo de absorción e índice de erosionabilidad para clasificar al mortero como apto o no para la construcción.

Por otro lado, se propuso la producción de una matriz compuesta por el mortero y la geomalla para su aplicación como refuerzo estructural. Esta parte de la metodología presenta el proceso de selección de la malla polimérica y la producción de la matriz, a partir del

mortero óptimo y el refuerzo polimérico descrito, para su caracterización mecánica. Los ensayos descritos evalúan el comportamiento de la matriz permitiendo obtener propiedades mecánicas y patrones de falla, datos importantes para la ejecución de ensayos del reforzamiento aplicado al sistema de albañilería. Como cierre de la metodología, se propone el ensayo de corte cíclico que determina si el sistema de reforzamiento estructural verifica un desempeño sísmico adecuado para ser considerada su aplicación como sistemas constructivos alternativos en países sísmicos.

Campaña experimental para la validación del procedimiento de desarrollo de morteros para el reforzamiento estructural

La campaña experimentar elaborada permitió validar la primera parte de la metodología presentada, correspondiente a la producción de morteros óptimos para la caracterización física y mecánica, y su respectiva evaluación de resistencia al agua. La aplicación de la metodología demostró su eficacia al obtener morteros óptimos que satisfacen los requerimientos de resistencia y compatibilidad, en relación a la trabajabilidad y adherencia, con sistemas de albañilería de BTC-E. El desarrollo del mortero, inicia con el análisis de las propiedades físicas del suelo base (SB), la cual se mejoró con la adición de 30% de arenas al no cumplir con las exigencias granulométricas de la norma ARS 681 (1996). El proceso de estabilización se llevó a cabo en dos etapas para lo cual se estabilizó al 10% y 20% a fin de determinar el porcentaje óptimo que cumplan con la resistencia mínima que indica la metodología. La estabilización al 20% presentó mejores resultados en cuanto a resistencia, se desarrollaron morteros SC20 (100%) con 20% de cemento y, SCL20 (75%) con 15% y 5% de cemento y cal respectivamente. Estos alcanzaron a los 28 días resistencias de compresión igual a 9.84 MPa (CV 2.6%) y 6.78 MPa (CV 6.1%) superando la resistencia mínima equivalente a 3 MPa. Dichas resistencias conllevaron a la obtención de esfuerzos de flexión iguales 2.28 MPa (CV 2.8%) y 2.02 MPa (CV 9.6%) a los 28 días para SC20 (100%) y SCL20 (75%), sobrepasando la resistencia mínima igual a 0.75 MPa. Respecto a la resistencia de los morteros óptimos al agua, se concluyó que los ensayos indicados en la metodología cubren todos los aspectos necesarios para asegurar el correcto performance de los sistemas de reforzamiento estructural cuando están expuestos al agua de lluvias. Para la ejecución de esta parte de la metodología, se fabricó un mortero S de control y los morteros estabilizados SC20 (100%) y SCL20 (75%) ensayados a permeabilidad, absorción y erosión. Se obtuvo que el mortero S presenta una pobre resistencia al agua con desenlaces catastróficos al término del ensayo por la desintegración del material. Mientras que, los

morteros estabilizados son hidrófobos por tanto presentan una alta resistencia al agua siendo considerados aptos para la construcción. La categorización se basó en los criterios de evaluación propuestos por la metodología, que condicionan un máximo contenido de absorción de agua e índice de erosionabilidad para determinar si un material es apto o no en la construcción. No obstante, los rangos propuestos provienen de normativas diseñadas para la evaluación de bloques de tierra, por lo que, se adaptó estos valores a los espesores de 10 mm y 20 mm de la matriz de reforzamiento. Fuera de esto, finalmente, se valida el uso de la metodología para la producción de sistemas de reforzamiento para construcciones de albañilería con BTC-E en países sísmicos.

5.2 Trabajo futuro

En base a lo presentado anteriormente, se recomienda algunos puntos importantes a considerar en investigaciones futuras.

- Como una parte de la metodología planteada ya se ha evaluado obteniéndose resultados satisfactorios, se debería continuar la investigación desarrollando las demás etapas de la metodología. De esta manera, se garantiza que los ensayos presentados son los adecuados y necesarios para caracterizar mecánicamente sistemas de reforzamiento estructural.
- Si bien los ensayos presentados permiten evaluar la durabilidad por la simulación acelerada de condiciones climáticas, sería interesante determinar la resistencia de estas estructuras para períodos prolongados de al menos 1 año frente a condiciones reales del país.
- Sería conveniente evaluar la posibilidad de utilizar un tipo de refuerzo diferente al presentado en esta metodología, con el fin de comparar el desempeño sísmico entre ambas.
- Respecto al mortero desarrollado, se recomienda estudiar la influencia de añadir o reemplazar alguno de los estabilizantes en términos de trabajabilidad, resistencia y compatibilidad con la albañilería de BTC-E.
- Para la ejecución de los ensayos de durabilidad se siguió las normativas correspondientes, sin embargo, se podría estudiar la realización de estos ensayos ajustando ciertos parámetros a condiciones reales del país. Debido a la variedad climatológica del Perú, se debería establecer una región específica y definir las condiciones de humedad y temperatura.

REFERENCIAS

- AC 434. (2011). Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems. *ES ICC Evaluation Service*.
- Adam, E., & Agib, A. (2001). Compressed stabilised earth block manufacture in Sudan. In *UNESCO*.
- AFAM (Asociación nacional de fabricantes de mortero). (n.d.). Uso de los morteros de albañilería y revoco. Retrieved April 3, 2020, from <http://afam.es/albanileria-y-revestimiento/uso-de-los-morteros-de-albanileria-y-revoco/>
- Aguilar, R., Nakamatsu, J., Ramírez, E., Elgegren, M., Ayarza, J., Kim, S., ... Ortega-San-Martin, L. (2016). The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction. *Construction and Building Materials*, 114, 625–637. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.218>
- Alvarez, S. (2018). *Comparación de las propiedades mecánicas de unidades y prismas de bloques de tierra comprimida estabilizada con cemento y geopolímero de puzolana* (Tesis de maestría). Recuperada de: <http://tesis.pucp.edu.pe>, Lima, Perú.
- Antunes, G. R., & Masuero, Â. B. (2016). Flexural tensile strength in mortar coating reinforced with different types of metal mesh: A statistical comparison. *Construction and Building Materials*, 121, 559–568. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.033>
- Arizzi, A., Brümmer, M., Martín-Sánchez, I., Cultrone, G., & Viles, H. (2015). The Influence of the Type of Lime on the Hygric Behaviour and Bio-Receptivity of Hemp Lime Composites Used for Rendering Applications in Sustainable New Construction and Repair Works. *PLOS ONE*, 10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0125520>
- Arteaga, K., Medina, O., & Gutierrez, O. (2011). Bloque de tierra comprimida como material constructivo. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 20, 55–68.
- ASTM C109. (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM C1314. (2018). Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM C1341 - 13. (2018). Standard Test Method for Flexural Properties of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramic Composites. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM C230. (2021). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM C348. (2020). Standard Test Methods for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars. *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- ASTM C67. (2020). Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural

- Clay Tile. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM D2216. (2019). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM D4318. (2017). Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM D5381-93. (2021). Standard Guide for X-Ray Fluorescence (XRF) Spectroscopy of Pigments and Extenders. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM D559. (2015). Standard Guide for Wetting and Drying Compacted Soil-Cement Mixtures. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM D6637. (2015). Standard Test Method for Determining Tensile Properties of Geogrids by the Single or Multi-Rib Tensile Method. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM D7928. (2017). Standard Test Method for Particle-Size Distribution (Gradation) of Fine-Grained Soils Using the Sedimentation (Hydrometer) Analysis. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM D854. (2014). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- ASTM E2126. (2019). Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings. *ASTM International, West Conshohocken, PA.*
- Astorga, S. (2011). *Análisis del comportamiento de muros de adobe reforzados con geomalla ante esfuerzos cíclicos laterales*. Recuperada de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/5023/fichero/3.-Documentos%252FMemoria.pdf>, Sevilla, España.
- Babaeidarabad, S., De Caso, F., & Nanni, A. (2013). Out-of-Plane Behavior of URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite. *Journal of Composites for Construction*, 04013057-1-04013057-11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC)
- Bland, D. (2011). *In-plane cyclic shear performance of interlocking compressed earth block walls* (Tesis de maestría). Recuperada de: <https://digitalcommons.calpoly.edu/>, San Luis Obispo, California.
- Blondet, M., García, G. V., Brzev, S., & Rubiños, Á. (2011). *Earthquake-Resistant construction of adobe buildings: A tutorial* (2 nd). California, USA: EERI/IAEE World Housing Encyclopedia.
- Blondet, M., Torrealva, D., Vargas, J., Velasquez, J., & Tarque, N. (2006). Seismic reinforcement of adobe houses using external polymer mesh. *1rst European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 3–8. Ginebra, Suiza.
- Blondet, M., Vargas, J., Torrealva, D., & Rubiños, Á. (2011). *Manual de Construcción con adobe reforzado con geomallas de viviendas de bajo costo saludables y seguras* (1 ed.).

- Lima, Perú: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Bui, Q.-B., Morel, J. c., Hans, S., & Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building Materials*, 54, 163–169. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067>
- Burroughs, V. S. (2001). *Quantitative criteria for the selection and stabilisation of soils for rammed earth wall construction* (Tesis de doctoral). Recuperada de: unswworks.unsw.edu.au, Sidney, Australia.
- Callister, W., & Rethwisch, D. (2012). Materials science and Engineering: An Introduction. In *Binder Ready Version+ WileyPLUS Registration Card*. (9th ed.). [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(93\)95111-H](https://doi.org/10.1016/0168-583X(93)95111-H)
- Cárdenas, R. A., & Luna, J. J. (2017). *Estudio experimental de la influencia de los diferentes tipos de mortero y substratos de albañilería en la adhesión con geomallas*. Recuperada de: <http://tesis.pucp.edu.pe>, Lima, Perú.
- Carozzi, F., Antino, T. D., Gatti, A., Mantegazza, G., & Poggi, C. (2020). Characterization of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) composites for structural retrofitting. In M. di Prisco & M. Menegotto (Eds.), *Conference on Italian Concrete* (Vol. 42, pp. 235–247). https://doi.org/10.1007/978-3-030-23748-6_18
- Carozzi, F., Milani, G., & Poggi, C. (2014). Mechanical properties and numerical modeling of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for strengthening of masonry structures. *Composite Structures*, 107, 711–725. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.08.026>
- Carozzi, & Poggi, C. (2015). Mechanical properties and debonding strength of Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) systems for masonry strengthening. *Composites: Part B*, 70, 215–230. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.056>
- Carvalho, M. A. (2015). *Desenvolvimento e validação de uma solução construtiva em BTC* (Tesis de maestría). Recuperada de: <http://repositorium.sdum.uminho.pt>, Guimarães, Portugal.
- Cid, J. J. (2012). *Durabilidad de los bloques de tierra comprimida. Evaluación y recomendaciones para normalización de los ensayos de erosión y absorción* (Tesis Doctoral). Recuperada de: <http://oa.upm.es>, Madrid, España.
- Dalalbashi, A., Ghiassi, B., & Oliveira, D. V. (2019). Textile-to-mortar bond behaviour in lime-based textile reinforced mortars. *Construction and Building Materials*, 227, 116682. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116682>
- De Felice, G., Aiello, M. A., Caggegi, C., Ceroni, F., De Santis, S., Garbin, E., ... Viskovic, A. (2018). Recommendation of RILEM Technical Committee 250-CSM: Test method for textile reinforced mortar to substrate bond characterization. *Materials and Structures*, 51–95. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1216-x>
- De Felice, G., De Santis, S., Garmendia, L., Ghiassi, B., Larrinaga, P., Lourenço, P. B., ... Papanicolaou, C. G. (2014). Mortar-based systems for externally bonded strengthening of masonry. *Materials and Structures*, 47(12), 2021–2037. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0360-1>

- Delinière, R., Aubert, J. E., Rojat, F., & Gasc-Barbier, M. (2014). Physical, mineralogical and mechanical characterization of ready-mixed clay plaster. *Building and Environment*, 80, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.012>
- Dey, V. (2016). *Innovative structural materials and sections with strain hardening cementitious composites* (Tesis doctoral). Recuperada de: <https://repository.asu.edu>, Arizona, USA.
- DIN 18947. (2018). Earth plasters - Requirements, test and labelling. *Deutsche Institut Für Normung e.V. (DIN), Tiergarten, BLN*.
- Donaire, M. (2016). *Ensayos de calidad de mallas electrosoldadas*. Retrieved from <http://bibing.us.es/proyectos/abreproj/20510/fichero/PFC+Marta+Donaire+Bajo.pdf>
- Donrak, J., Horpibulsuk, S., Arulrajah, A., Kou, H. lei, Chinkulkijniwat, A., & Hoy, M. (2018). Wetting-drying cycles durability of cement stabilised marginal lateritic soil/melamine debris blends for pavement applications. *Road Materials and Pavement Design*, 21 (2), 500–518. <https://doi.org/10.1080/14680629.2018.1506816>
- Esteve, M. (2016). *Estudio de las características del Bloque de Tierra Comprimida Industrializado*. Recuperada de: <http://oa.upm.es>, Madrid, España.
- Fares, A. E., Hassan, H., & Arab, M. (2020). *Concrete Slabs Containing Treated and Untreated*.
- Faria, P., Santos, T., & Aubert, J. E. (2016). Experimental Characterization of an Earth Eco-Efficient Plastering Mortar. *Materials in Civil Engineering*, 28(1), 04015085. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001363](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001363).
- Garcia-Ramonda, L., Pelá, L., Roca, P., & Camata, G. (2020). In-plane shear behaviour by diagonal compression testing of brick masonry walls strengthened with basalt and steel textile reinforced mortars. *Construction and Building Materials*, 240, 117905. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117905>
- García-Vera, V., & Lanzón, M. (2018). Physical-chemical study, characterisation and use of image analysis to assess the durability of earthen plasters exposed to rain water and acid rain. *Construction and Building Materials*, 187, 708–717. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.235>
- Gattesco, N., & Boem, I. (2017). Characterization tests of GFRM coating as a strengthening technique for masonry buildings. *Composite Structures*, 165, 209–222. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.01.043>
- Ghiassi, B., Oliveira, D. V., Marques, V., Soares, E., & Malijaee, H. (2016). Multi-level characterization of steel reinforced mortars for strengthening of masonry structures. In *Materials and Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.034>
- Gomes, M., Faria, P., & Gonçalves, T. (2017). Earth-based mortars for repair and protection of rammed earth walls. Stabilization with mineral binders and fibers. *Journal of Cleaner Production*, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.170>
- Gomes, M.I., Gonçalves, T. D., & Faria, P. (2012a). Análise experimental de argamassas de terra com cais e fibras naturais. *4.º Congresso Português de Argamassas e ETICS*, 1–19. Retrieved from http://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/d1/038_PP Idalia

Gomes.pdf

- Gomes, M.I., Gonçalves, T. D., & Faria, P. (2012b). Evaluación de la influencia del contenido de agua en la trabajabilidad del mortero de tierra. *Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 25(2), 258–277.
- Gomes, Maria Idália, Gonçalves, T. D., & Faria, P. (2016). Hydric Behavior of Earth Materials and the Effects of Their Stabilization with Cement or Lime: Study on Repair Mortars for Historical Rammed Earth Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(7), 04016041. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0001536](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0001536)
- Guerrero, L., Roux, R., & Soria, F. J. (2010). Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México. *Revista Palapa*, 5(10), 45–57.
- Guettala, A., Houari, H., Mezghiche, B., & Chebili, R. (2002). Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier Du Savoir*, 2, 61–66. <https://doi.org/10.1680/scc.31777.0064>
- Guillaud, H., Joffroy, T., Odul, P., & CRATerre-EAG. (1985). *Compressed earth blocks: Manual of design and construction*. Vol. II: Manual of design and construction.
- Gupta, A., & Venkatarama, B. V. (2005). Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils. *Materials and Structures*, 38, 651–658. <https://doi.org/10.1617/14265>
- Hall, M. R., Najim, K. B., & Keikhaei Dehdezi, P. (2012). Soil stabilisation and earth construction: materials, properties and techniques. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krähenhoff (Eds.), *Modern earth buildings: Materials, engineering, construction and applications* (1 st, pp. 222–255). <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.222>
- HB 195. (2002). The Australian Earth Building Handbook. *Standards Australia International Ltd., New South Wales, SYD*.
- Heathcote, K. (1991). Compressive strength of cement stabilized pressed earth blocks: strength of cement stabilized pressed earth blocks depends on cement content and compacted density—simple formula presented to predict strength based on variables. *Building Research and Information*, 19(2), 101–105. <https://doi.org/10.1080/09613219108727106>
- Heathcote, K. (1995). Durability of earthwall buildings. *Construction and Building Materials*, 9(3), 185–189. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00035-E](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00035-E)
- Holliday, L., Ramseyer, C., Reyes, M., & Butko, D. (2016). Building with Compressed Earth Block within the Building Code. *Architectural Engineering*, 22(3), 1–13. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.0000198](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000198).
- Houben, H., & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. <https://doi.org/10.3362/9781780444826>
- IS 13827. (1993). Improving earthquake resistance of earthen buildings - Guidelines. *Bureau of Indian Standards, Bahadur Shah Zafar Marg, ND*.
- IS 1725. (1982). Soil based blocks used in general building construction. *Bureau of Indian Standards, Bahadur Shah Zafar Marg, ND*.

- IS 2110. (1980). Code of practice for in situ construction of walls in buildings with soil-cement. *Bureau of Indian Standards, Bahadur Shah Zafar Marg, ND.*
- Izemouren, O., Guettala, A., & Guettala, S. (2015). Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks. *Geotechnical and Geological Engineering*, 33(5), 1321–1333. <https://doi.org/10.1007/s10706-015-9904-6>
- Janik, L. J., Skjemstand, J. O., & Raven, M. D. (1995). Characterization and Analysis of Soils using Mid-infrared Partial Least Squares. I. Correlations with XRF-determined Major Element Composition. *Soil Research*, 33(4), 621–636.
- Jaqin, P. (2012). History of earth building techniques. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Eds.), *Modern earth buildings: Materials, engineering, construction and applications* (1 st, pp. 307–323). <https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.307>
- Juárez, L. A., Caballero, T., & Morales, V. (2010). Ventajas del reforzamiento de muros de bloques de tierra compactados (BTC), como opción para el rescate de viviendas rurales. *Informes de La Construcción*, 62(518), 25–32. <https://doi.org/10.3989/ic.08.000>
- Kebao, R., & Kagi, D. (2012). Integral admixtures and surface treatments for modern earth buildings. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Eds.), *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (1 st, pp. 256–281). <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.256>
- Kinuthia, J. M. (2015). The durability of compressed earth-based masonry blocks. In F. Pacheco-Torgal, P. B. Lourenço, J. A. Labrincha, S. Kumar, & P. Chindaprasirt (Eds.), *Eco-efficient Masonry Bricks and Blocks* (pp. 393–421). <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-305-8.00018-8>
- Lacouture, L., Bernal, C., Reyes, J., & Ruiz, D. (2007). Estudios de vulnerabilidad sísmica, rehabilitación y refuerzo de casas en adobe y tapia pisada. *Apuntes: Revista de Estudios Sobre Patrimonio Cultural - Journal of Cultural Heritage Studies*, 20(2), 286–303.
- Lima, J., Faria, P., & Santos Silva, A. (2020). Earth Plasters: The Influence of Clay Mineralogy in the Plasters' Properties. *International Journal of Architectural Heritage*, 14(7), 948–963. <https://doi.org/10.1080/15583058.2020.1727064>
- Malisa, A. S., Park, E., & Lee, J. (2014). Effect of lime on physical properties of natural pozzolana from Same, Tanzania. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 3(11), 1357–1361.
- Maras, M. M., & Kose, M. M. (2019). Mechanical and microstructural properties of polypropylene fiber-reinforced geopolymers composites. *Journal of Fiber Science and Technology*, 75(5), 35–46. <https://doi.org/10.2115/FIBERST.2019-0006>
- Medvey, B., & Dobiszay, G. (2020). Durability of Stabilized Earthen Constructions: A Review. *Geotechnical and Geological Engineering*, 6, 2403–2425. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01208-6>
- Miccoli, L., Müller, U., & Fontana, P. (2014). Mechanical behaviour of earthen materials: A comparison between earth block masonry, rammed earth and cob. *Construction and Building Materials*, 61, 327–339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.009>

- Minke, G. (2006). *Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Berlín, Alemania: Birkhauser.
- Mohamed, R. N. A., El Sebai, A. M., & Gabr, A. S. A. H. (2020). Flexural behavior of fanpalm reinforced concrete slabs. *Journal of Building Engineering*, 13, 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.07.005>
- Morel, J. c., Bui, Q.-B., & Hamard, E. (2012). Weathering and durability of earthen material and structures. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Eds.), *Modern Earth Buildings: Materials, Engineering, Constructions and Applications* (1 st, pp. 282–303). <https://doi.org/10.1533/9780857096166.2.282>
- Mulabdić, M., Minažek, K., & Kaluđer, J. (2018). Geogrids - what is important. *5th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, 5, 215–221. <https://doi.org/10.5592/co/cetra.2018.934>
- Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G., & Jagadish, K. S. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of compressed stabilized earth blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2014.03.001>
- Nakamatsu, J., Kim, S., Ayarza, J., Ramírez, E., Elgegren, M., & Aguilar, R. (2017). Eco-friendly modification of earthen construction with carrageenan: Water durability and mechanical assessment. *Construction and Building Materials*, 139, 193–202. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.062>
- NBR 10833. (2013). Manufacture of brick and block of soil-cement with use of a manual or hydraulic brickmaking machine — Procedure. *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Treze de Maio, RJ*.
- NBR 8491. (2012). Soil-cement brick — Requirements. *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Treze de Maio, RJ*.
- NBR 8492. (2012). Soil-cement brick — Dimensional analysis, compressive strength determination and water absorption — Test method. *Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Treze de Maio, RJ*.
- Neves, C., & Faria, O. B. (2011). *Técnicas de construcción con tierra* (C. Neves, G. M. Viñuales, L. F. Guerrero, & R. Rotondaro, Eds.). Sao Paula, Brasil: PROTERRA.
- NTE E.070. (2006). Albañilería. *Sensico, San Borja, LIM*.
- NTP 399.613. (2017). Unidades de albañilería: Métodos de muestreo y ensayo de ladrillos de arcilla usados en albañilería. *Sensico, San Borja, LIM*.
- NZS 4298. (2020). Materials and construction for earth buildings. *New Zealand Technical Committee, Wellington, NZ*.
- Olivito, R. S., Cevallos, O. A., & Carrozzini, A. (2014). Development of durable cementitious composites using sisal and flax fabrics for reinforcement of masonry structures. *Materials and Design*, 57, 258–268. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.023>
- Patil, A. D., & Attar, A. C. (2015). Compressed stabilized earth blocks by using lime.

- International Journal of Engineering Research and Technology*, 4, 116–120.
<https://doi.org/10.17577/ijertv4is090204>
- Qu, B., Stirling, B. J., Jansen, D. C., Bland, D. W., & Laursen, P. T. (2015). Testing of flexure-dominated interlocking compressed earth block walls. *Construction and Building Materials*, 83, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.080>
- Raheem, A. A., Bello, O. A., Makinde, O. A., & Tech, B. (2010). A Comparative Study of Cement and Lime Stabilized Lateritic Interlocking. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 11(2), 27–34.
- Ramos, L. F., Sturm, T., Camões, A., Eires, R., Gomes, D., Lourenço, P., & Mendonça, P. (2014). *Hilotech - Self-building Manual for Sustainable Housing*. Guimarães, Portugal: University of Minho ? Department of Civil Engineering.
- Ribeiro, A. M. (2015). *Análise experimental do comportamento ao corte de paredes reforçadas em alvenaria de BTC* (Tesis de maestría). Recuperada de: <http://repository.sduum.uminho.pt>, Guimarães, Portugal.
- RILEM Technical Committee 232-TDT. (2016). Recommendation of RILEM TC 232-TDT: test methods and design of textile reinforced concrete. *Materials and Structures*, 49, 4923–4927. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0839-z>
- Riza, F. V., Rahman, I. A., Mujahid, A., & Zaidi, A. M. A. (2010). A brief review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB). *2010 International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010)*, 999–1004. <https://doi.org/10.1109/CSSR.2010.5773936>
- Salsavilca, J., Yacila, J., Tarque, N., & Camata, G. (2020). Experimental and analytical bond behaviour of masonry strengthened with steel reinforced grout (SRG). *Construction and Building Materials*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117635>
- San Bartolomé, Á., & Quiun, D. (2015). Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú. *Revista de La Facultad de Ingeniería U.C.V*, 30(1), 71–80.
- Santos, T., Faria, P., & Silva, V. (2019). Can an earth plaster be efficient when applied on different masonries? *Journal of Building Engineering*, 23, 314–323. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.02.011>
- Sharma, V., Marwaha, B. M., & Vinayak, H. K. (2016). Enhancing durability of adobe by natural reinforcement for propagating sustainable mud housing. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 5(1), 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.03.004>
- Silva, R. A., Soares, E., Oliveira, D. V., Miranda, T., Cristelo, N. M., & Leitão, D. (2015). Mechanical characterisation of dry-stack masonry made of CEBs stabilised with alkaline activation. *Construction and Building Materials*, 75, 349–358. <https://doi.org/dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.038>
- Solís, M., Torrealva, D., Santillán, P., & Montoya, G. (2015). Análisis del comportamiento a flexión de muros de adobe reforzados con geomallas. *Informes de La Construcción*, 67, 539–549. <https://doi.org/10.3989/ic.13.141>

- Stazi, F., Nacci, A., Tittarelli, F., Pasqualini, E., & Munafò, P. (2016). An experimental study on earth plasters for earthen building protection: The effects of different admixtures and surface treatments. *Journal of Cultural Heritage*, 17, 27–41.
<https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.07.009>
- Sturm, T., Ramos, L. F., & Lourenço, P. B. (2015). Characterization of dry-stack interlocking compressed earth blocks. *Materials and Structures*, 48(9), 3059–3074.
<https://doi.org/10.1617/s11527-014-0379-3>
- Tate, M. (2005). The most important property of cement-lime mortar in masonry construction is *International Building Lime Symposium*, 1–13.
- Torrealva, D., Blondet, M., Vargas, J., Tarque, N., & Velásquez, J. (2006). Seismic reinforcement of adobe houses using external polymer mesh. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, (September), 1–8.
- Udawattha, C., De Silva, D. E., Galkanda, H., & Halwatura, R. (2018). Performance of natural polymers for stabilizing earth blocks performance of natural polymers for stabilizing earth blocks. *Materialia*, 2, 23–32. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.07.019>
- UNE 41410. (2008). Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. *Asociación Española de Normalización, UNE, Génova, MD*.
- UNE EN 1015-11. (2020). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. *Asociación Española de Normalización, UNE, Génova, MD*.
- UNE EN 1015-18. (2003). Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 18: Determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del mortero endurecido. *Asociación Española de Normalización, UNE, Génova, MD*.
- UNE EN 1015-3. (2000). Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas). *Asociación Española de Normalización, UNE, Génova, MD*.
- UNE EN 1052-3. (2003). Métodos de ensayo para fábricas de albañilería. Parte 3: Determinación de la resistencia inicial a cortante. *Asociación Española de Normalización, UNE, Génova, MD*.
- Uzoegbo, H. C. (2016). Dry-stack and compressed stabilised earth-block construction. In K. Harries & B. Sharma (Eds.), *Nonconventional and Vernacular Construction Materials: Characterisation, Properties and Applications* (pp. 205–249).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100038-0.00008-1>
- Valle, A. (2019). *Evaluación experimental del comportamiento de muros de adobe reforzados con cuerdas sometidas a carga lateral cíclica* (Tesis de maestría). Recuperada de: <http://tesis.pucp.edu.pe>, Lima, Perú.
- Venkatarama, B. V. (2012). Stabilised soil blocks for structural masonry in earth construction. In M. R. Hall, R. Lindsay, & M. Krayenhoff (Eds.), *Modern earth buildings: Materials, engineering, construction and applications* (1 st, pp. 324–363).
<https://doi.org/10.1533/9780857096166.3.324>

- Venkatarama, B. V., & Prasanna, P. (2010). Cement stabilised rammed earth. Part A: Compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils. *Materials and Structures*, 44, 681–693. <https://doi.org/10.1617/s11527-010-9658-9>
- Walker, P., & Stace, T. (1997). Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 30, 545–551. <https://doi.org/10.1007/bf02486398>
- Yacila, J., Salsavilca, J., Tarque, N., & Camata, G. (2019). Experimental assessment of confined masonry walls retrofitted with SRG under lateral cyclic loads. *Engineering Structures*, 199. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109555>
- Yacila, L., & Salsavilca, J. (2019). *Aplicación de la fibra de acero galvanizado para el reforzamiento estructural de muros de albañilería confinada ante cargas cíclicas en su plano* (Tesis de maestría). Recuperada de: <http://tesis.pucp.edu.pe>, Lima, Perú.
- Yuan, Y., & Lee, T. R. (2013). Contact Angle and Wetting Properties. In G. Bracco & B. Holst (Eds.), *Springer Series in Surface Sciences*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34243-1>

