

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**COMPORTAMIENTO A CARGA LATERAL DE UN MURO
CONFINADO DE ALBAÑILERÍA SÍLICO CALCÁREA**

Tesis para optar el título de Ingeniera Civil, que presenta la bachillera:

Elizabeth Yesenia Villanueva Gomez

Asesor: Daniel Quiun Wong

Lima, mayo de 2019

RESUMEN

El Perú es un país muy vulnerable a sismos debido a su ubicación geográfica. Hace 12 años el sur de nuestro país fue golpeado por uno de los terremotos más violentos de nuestra historia; ya que fue uno de los más destructivos en el cual se pudieron presenciar daños en diferentes construcciones, principalmente en aquellas de adobe, albañilería y algunas de hormigón armado. Uno de los principales motivos por los que se dieron estos daños fue la baja calidad de materiales de construcción empleados, ya que en muchos departamentos del Perú se utilizan unidades de albañilería huecas en la construcción de muros portantes, lo cual está prohibido por la Norma E.070.

Las viviendas deben ser construidas con materiales de alta calidad, para evitar pérdidas materiales y sobre todo pérdidas humanas, es por ello que surge el interés por estudiar alternativas de materiales de calidad que puedan garantizar el buen comportamiento de las estructuras frente a sismos.

La tesis tiene como objetivo el estudio y evaluación estructural de un nuevo material en el mercado, el ladrillo sílico calcáreo King Kong 11H, como una alternativa en la construcción de muros portantes de albañilería, ya que, debido al porcentaje de vacíos de la unidad, según la Norma E.070 clasifica como macizo, apto para la construcción de este tipo de muros. Para ello, en el proceso de investigación se construyó un muro confinado de albañilería con ladrillos sílico calcáreos 11H a escala natural, el cual fue sometido a un ensayo de carga lateral cíclica con control de desplazamiento. Con este ensayo se buscó conocer el comportamiento sísmico del muro, obteniendo su capacidad de corte, rigidez, deformación, etc.; así como el tipo de falla y las zonas más críticas.

Adicionalmente, se hizo la construcción de 3 pilas y 3 muretes de albañilería con ladrillos 11H, para poder estimar las propiedades de la albañilería simple y así explicar el comportamiento del muro a escala natural. También se realizaron las pruebas clasificatorias y no clasificatorias en las unidades de albañilería 11H y los respectivos ensayos de las probetas de cada elemento utilizado como confinamiento para poder tener un control de los materiales empleados en la construcción del muro.

Finalmente, se realizó un análisis de los puntos más importantes del muro considerando los desplazamientos laterales a los que fue sometido, con el fin de corroborar si cumple como muro portante, además de plantear recomendaciones y conclusiones sobre el uso de este nuevo ladrillo King Kong 11H.

De los resultados obtenidos se concluye que el comportamiento estructural del muro confinado fue satisfactorio. Aunque solo se ensayó un muro, los resultados obtenidos indican que este tipo de ladrillo puede aceptarse y usarse como una buena alternativa a los ladrillos de arcilla sólida. Además, los ladrillos huecos de arcilla que comúnmente son mal empleados en muros estructurales debido a la cantidad de agujeros que presentan, podrían reemplazarse por ladrillos 11H, y de esta manera mejorar el comportamiento sísmico de las construcciones.

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres, Elizabeth y Jesús, quienes siempre me brindaron su apoyo incondicional y me guiaron a lo largo de cada etapa vivida, lo cual me permitió culminar con éxito mi formación profesional.

Dedico mi trabajo a mi hermana Carla, por compartir conmigo sus alegrías, sus sueños y sus frustraciones. Su compañía ha sido fundamental durante esta etapa.

Finalmente dedico esta tesis a mis abuelos, quienes son mi fortaleza y están muy orgullosos por cada logro obtenido.

AGRADECIMIENTOS

Al Ingeniero Daniel Quiun, mi asesor, por el constante apoyo, la dedicación y la disposición en toda la etapa de elaboración de la tesis. Gracias por cada conocimiento brindado y por la motivación, ya que todo lo mencionado hizo posible la culminación de este proyecto.

A la Compañía Minera Luren, en la persona del Ing. Alejandro Garland, por apostar por esta tesis y brindarme todo su apoyo desde el inicio de este proyecto, en los materiales y la mano de obra, en la etapa de la construcción y ensayos de laboratorio.

A la Ing. Gladys Villa García, jefa del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, por el apoyo en el uso de las instalaciones y a todo el equipo de técnicos y profesionales del laboratorio que me brindaron su apoyo, compartieron sus conocimientos y me orientaron durante cada etapa del proyecto.

A los profesores y amigos que pude conocer en toda mi etapa universitaria, con los cuales compartí buenos momentos y nuevos conocimientos.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1.Descripción del proyecto	1
1.2.Objetivos del proyecto	3
1.3.Estado del arte	3

CAPÍTULO 2: MATERIALES EMPLEADOS Y ENSAYOS

2.1.Ladrillo Sílico Calcáreo King Kong 11H	10
2.2.Caraterísticas del ladrillo king kong 11H.....	10
2.3.Ensayos clasificatorios en la unidad de albañilería	12
2.3.1.Variación dimensional.....	12
2.3.2.Alabeo	14
2.3.3.Resistencia a la compresión.....	16
2.4.Ensayos no clasificatorios en la unidad de albañilería	18
2.4.1.Absorción	18
2.4.2.Succión.....	20
2.4.3.Área de huecos	22
2.5.Mortero.....	24
2.5.1.Ensayo de compresión del mortero	24
2.6.Evaluación de resultados.....	28

CAPÍTULO 3: PRISMAS DE ALBAÑILERÍA

3.1.Pilas	30
3.1.1.Procedimiento de construcción.....	30
3.1.2.Montaje e instrumentación.....	31
3.1.3.Cálculo de la resistencia a compresión axial.....	32
3.1.4.Cálculo del módulo de elasticidad.....	34
3.2.Muretes.....	37
3.2.1.Procedimiento de construcción.....	37
3.2.2.Montaje e instrumentación.....	39
3.2.3.Cálculo de la resistencia al corte.....	39
3.2.4.Cálculo del módulo de corte (Gm).....	41
3.3.Evaluación de resultados.....	44

CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DEL MURO DE ALBAÑILERÍA SÍLICO CALCÁREA

4.1. Características del muro	46
4.2. Verificación previa del refuerzo	47
4.3. Construcción de la viga de cimentación	47
4.4. Construcción del muro de albañilería	50
4.5. Construcción de las columnas	53
4.6. Construcción de la viga solera	55

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS TEÓRICO DEL MURO A ESCALA NATURAL

5.1. Módulo de corte y elasticidad	58
5.2. Rigidez lateral	58
5.3. Fisuración en tracción por flexión	61
5.4. Agrietamiento diagonal teórico	62
5.5. Momento flector nominal máximo	63
5.6. Tipo de falla esperada	64

CAPÍTULO 6: ENSAYO CÍCLICO DE CARGA LATERAL

6.1. Descripción del ensayo	65
6.2. Montaje e instrumentación	66
6.3. Comportamiento del muro	68
6.4. Revisión visual post ensayo del muro confinado	77

CAPÍTULO 7: GRÁFICO DE RESULTADOS

7.1. Diagrama de lazos histeréticos	81
7.2. Envoltente del diagrama de lazos histeréticos	81

CAPÍTULO 8: COMPARACIÓN DE RESULTADOS

8.1. Rigidez lateral elástica	85
8.2. Cálculo del módulo de corte	86
8.3. Rotura diagonal	87
8.4. Distorsión angular	87
8.5. Fisuración de tracción por flexión	88
8.6. Comportamiento del refuerzo vertical	88
8.7. Carga máxima soportada	90
8.8. Degradación de la rigidez	91

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y LÍNEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN

9.1. Conclusiones.....92

9.2. Línea futura de investigación.....96

REFERENCIAS.....97



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Uso de unidades inadecuadas en edificaciones de Pisco (San Bartolomé, 2007).	2
Figura 2.1. Ladrillo King Kong 11H (Compañía Minería Luren, 2016).....	10
Figura 2.2. Herramientas empleadas para mediciones.....	13
Figura 2.3. Medición de unidades.....	13
Figura 2.4. Colocación de regla metálica y cuña para determinación de alabeo.....	15
Figura 2.5. Máquina de compresión.....	16
Figura 2.6. Unidades de albañilería luego de ensayo de compresión.....	16
Figura 2.7. Ladrillo secados al horno.....	18
Figura 2.8. Ladrillos siendo pesados luego de permanecer 24 h en agua destilada.....	19
Figura 2.9. Bandeja para ensayo.....	20
Figura 2.10. Ladrillos puestos a secar en máquina especial.....	21
Figura 2.11. Llenado de agujeros del ladrillo con arena Ottawa.....	22
Figura 2.12. Ladrillo luego que se enrasó la arena Ottawa.....	23
Figura 2.13. Colocación del mortero en 6 moldes metálicos.....	25
Figura 2.14. Apisonado de mortero en cada capa vaciada.....	25
Figura 2.15. Cubos desmoldados listos para ser sumergidos durante 28 días	25
Figura 2.16. Cubos sumergidos en agua	26
Figura 2.17. Medición de dimensiones de cubos de mortero.....	27
Figura 3.1. Pilas con ladrillo KK 11H, considerando mortero de 1 cm.....	30

Figura 3.2. Construcción de pilas.....	31
Figura 3.3. Instrumentación en pilas.....	32
Figura 3.4. Fallas en pilas.....	34
Figura 3.5. Gráficas Fuerza Vs Desplazamiento en las 3 pilas	36
Figura 3.6. Murete de 67x67 cm.....	37
Figura 3.7. Colocación de ladrillos maestros en los 3 muretes.....	38
Figura 3.8. Muretes de ladrillo KK 11H	38
Figura 3.9. Falla típica en muretes	40
Figura 3.10. Gráficos Fuerza Vs Desplazamiento en los 3 muretes	43
Figura 4.1. Muro de albañilería confinada sílico calcárea.....	46
Figura 4.2. Refuerzo utilizado en Viga de cimentación.....	48
Figura 4.3. Armado de viga de cimentación.....	48
Figura 4.4. Vaciado de viga de cimentación.....	49
Figura 4.5. Probetas de viga de cimentación.....	49
Figura 4.6. Delimitación de primera hilada de ladrillos.....	50
Figura 4.7. Realización de la prueba de la plancha.....	51
Figura 4.8. Asentado de la primera etapa de ladrillos.....	52
Figura 4.9. Asentado de la segunda etapa de ladrillos	52
Figura 4.10. Refuerzo en columna de confinamiento.....	53
Figura 4.11. Acero de columnetas y chicotes.....	53
Figura 4.12. Encofrado de columnetas	54

Figura 4.13. Acero en viga solera.....	55
Figura 4.14 Colocación de refuerzo en viga solera	55
Figura 4.15. Vaciado de viga solera.....	56
Figura 4.16. Ensayo de compresión de probetas	56
Figura 4.17. Muro de albañilería terminado dentro del laboratorio	57
Figura 5.1. Sección de muro de albañilería construido en el laboratorio	59
Figura 5.2. Sección transformada de muro de albañilería	60
Figura 6.1. Actuador dinámico en muro	66
Figura 6.2. Colocación de los LVDT	67
Figura 6.3. Distribución de los sensores en muro	68
Figura 6.4. Fisuras en muro – fase 1	69
Figura 6.5. Fisuras en muro – fase 2	70
Figura 6.6. Fisuras en muro – fase 3	70
Figura 6.7. Fisuras en muro – fase 4	71
Figura 6.8. Fisuras en muro – fase 5	72
Figura 6.9. Fisuras en muro – fase 6	73
Figura 6.10. Fisuras en muro – fase 7	74
Figura 6.11. Fisuras en muro – fase 8	75

Figura 6.12. Fisuras en muro – fase 9	76
Figura 6.13. Fisuras en muro – armónico	77
Figura 6.14. Fisura marcada en columna de confinamiento	78
Figura 6.15. Fisuras en muro y trituración parcial de unidades.....	79
Figura 6.16. Trituración y desprendimiento de unidades en cara posterior de muro	80
Figura 7.1. Lazos histeréticos del muro sílico-calcáreo	81
Figura 7.2. Envolvente fuerza-desplazamiento del LVDT D1.....	83
Figura 7.3. Envolvente fuerza-desplazamiento con valores promedios absolutos	84
Figura 8.1. Lazo histerético de la fase1.....	85
Figura 8.2. Gráficos de fuerza horizontal – desplazamiento de los sensores D4 y D5.....	89
Figura 8.3. Gráfica de degradación de rigidez Vs desplazamiento por fase.....	91

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Especificaciones técnicas del ladrillo King Kong 11H (Compañía Minera Luren,2016)	12
Tabla 2.2. Variabilidad de dimensiones del ladrillo King Kong 11H.....	14
Tabla 2.3. Alabeos en ladrillo King Kong 11H.....	15
Tabla 2.4. Resultados de ensayo de compresión simple.....	17
Tabla 2.5. Resistencia a compresión y resistencia característica a compresión.....	17
Tabla 2.6. Resultados de ensayos de absorción.....	19
Tabla 2.7. Resultados de ensayos de succión.....	21
Tabla 2.8. Área de huecos en unidades de albañilería.....	23
Tabla 2.9. Dosificación para mortero (Compañía Minera Luren, 2016).....	24
Tabla 2.10. Resultados de ensayo de compresión del mortero.....	27
Tabla 2.11. Resistencia a compresión y resistencia característica a compresión.....	27
Tabla 2.12. Especificaciones del fabricante vs resultados de ensayos.....	28
Tabla 3.1. Factores de corrección de $f'm$ por esbeltez (SENCICO, 2006)	33
Tabla 3.2. Resistencia a la compresión de pilas.....	33
Tabla 3.3. Módulo de Elasticidad de pilas.....	37
Tabla 3.4. Resistencia al corte de muretes.....	40
Tabla 3.5. Módulo de corte.....	44
Tabla 3.6. Relación del Módulo de Elasticidad vs $f'm$	45
Tabla 3.7. Análisis de la resistencia al corte.....	45

Tabla 4.1. Resistencia de probetas de viga de cimentación.....	50
Tabla 4.2. Resistencia de probetas de columnetas.....	54
Tabla 4.3. Resistencia de probetas de viga solera.....	56
Tabla 5.1. Módulo de Corte teórico.....	58
Tabla 5.2. Factor de sección transformada.....	60
Tabla 5.3. Rigidez lateral teórica del muro.....	61
Tabla 5.4. Fuerza asociada a la primera fisura de tracción por flexión.....	62
Tabla 5.5. Cálculo de carga de agrietamiento diagonal.....	62
Tabla 5.6. Cálculo de momento nominal máximo.....	63
Tabla 6.1. Desplazamiento por cada fase del ensayo.....	65
Tabla 7.1. Valores de fuerza y desplazamiento del muro.....	82
Tabla 8.1. Cálculo de la rigidez lateral.....	86
Tabla 8.2. Rotura diagonal del muro sílico-calcáreo.....	87
Tabla 8.3. Límites para desplazamientos laterales de entrepiso (Norma E.030, 2016).....	87
Tabla 8.4. Fuerza de agrietamiento de tracción por flexión.....	88
Tabla 8.5. Máxima carga soportada.....	90
Tabla 8.6. Degradación de rigidez por fase.....	91

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Descripción del proyecto

El Perú es un país altamente vulnerable a sismos debido a su ubicación geográfica, ya que nos encontramos en el Cinturón de Fuego del Pacífico, zona de alta actividad sísmica, donde se produce la subducción de la Placa de Nazca y la Placa Sudamericana.

Uno de los últimos terremotos violentos ocurridos en el Perú fue el Terremoto de Pisco, que se dio el 15 de agosto del 2007 con una magnitud de 8.0 en la escala sismológica de magnitud de momento (Mw). Según el Instituto Nacional de Defensa Civil del Perú (INDECI-2007), se registraron más de 70,000 casas derrumbadas y más de 33,000 casas con algún daño. A. Bartolomé y D. Quiun (2008) mencionan que se pudo presenciar daños en diferentes construcciones, principalmente aquellas de adobe, albañilería, y algunas de hormigón armado, en las cuales se encontraba desde la presencia de grietas hasta el derrumbamiento total de la edificación (Fig. 1.1). Estos problemas se dieron por diversas razones: la calidad del suelo, baja calidad de materiales de construcción, técnicas de construcción deficientes y pobre configuración y diseño estructural.

Enfocándonos en la calidad de materiales de construcción, en muchos departamentos del Perú se utilizan ladrillos artesanales de arcilla, ladrillos pandereta y bloques de concreto vacíos (unidades de albañilería huecas) en la construcción de muros portantes para edificaciones de más de 3 pisos. Esto está prohibido por la Norma E.070 Albañilería, ya que estos ladrillos se suelen triturar rápidamente para derivas menores a las indicadas por la Norma E.030 Diseño Sismorresistente, degradando la rigidez y resistencia de las construcciones de muros de albañilería, generando fallas frágiles. Asimismo, uno de los materiales más empleados en varias ciudades del Perú, son los ladrillos de arcilla King Kong de 18 huecos, cuya área de asentado excede en huecos de lo permitido. Esos ladrillos con más de 30% de huecos en la cara de asentado, así como los mencionados anteriormente, no son aptos en muros portantes. La Norma E.070 indica que solo se podrán utilizar para la construcción de muros portantes, ladrillos sólidos o macizos, los cuales, son aquellos cuya área total de aberturas en la sección paralela a la cara de asentado, no sea mayor al 30% del área del ladrillo.

Muchas personas por falta de conocimiento o por tratar de buscar la economía prefieren usar este tipo de materiales inadecuados, poniendo en riesgo sus vidas ante la ocurrencia de sismos fuertes.

La presente investigación, estudia el uso de uno de los últimos ladrillos presentados al mercado, el ladrillo Sílico Calcáreo KING KONG 11H. Este ladrillo posee un porcentaje de área de vacíos de 29%; por ende, puede ser utilizado en muros portantes, ya que califica como ladrillo sólido debido al porcentaje de su área de vacíos. El ladrillo KK 11H es una unidad de albañilería compuesta de una mezcla de arena fina natural, cal hidratada y agua, y tiene la particularidad de que las perforaciones no llegan a la cara de asiento superior o tapas. La Compañía Minería Luren (2015), empresa productora de estos ladrillos, menciona que este material tiene una serie de ventajas tanto para el constructor como para el usuario final. Entre las ventajas para el constructor tenemos: 1) menor espesor de tarrajeo, dado que se puede tarrajar con un máximo de 1 cm de espesor; 2) no necesita mojarse, por su baja succión; 3) alta adhesión entre ladrillos, ya que las unidades de albañilería presentan la cara superior sin perforaciones lo que brinda mayor área de contacto, potenciando la adhesión. Entre los beneficios para el usuario final tenemos: resistencia al fuego mayor a 4 horas, mayor durabilidad, mejor filtro acústico y un acabado semi caravista.

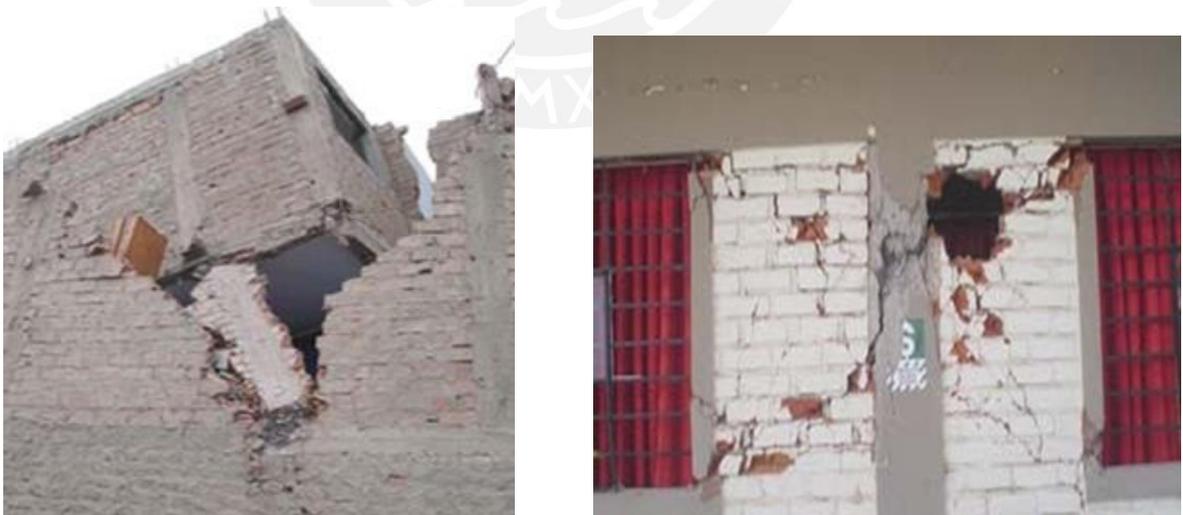


Figura 1.1 Uso de unidades inadecuadas en edificaciones de Pisco (San Bartolomé, 2007)

1.2. Objetivos del proyecto

El objetivo principal del proyecto es analizar mediante ensayos de laboratorio el comportamiento sísmico de un muro de albañilería confinada sílico calcárea (Ladrillo KK11H) para poder demostrar cómo se puede contribuir a mejorar el comportamiento de las estructuras hechas con muros portantes, y por ende la seguridad de las edificaciones frente a sismos. Como parte de nuestro estudio, se ensayarán las unidades de albañilería, el mortero, el concreto; así como también, se ensayarán pilares y muretes para poder determinar la resistencia de la albañilería y predecir la falla que se presentará durante el ensayo del muro a escala natural.

Se estudiará el uso de ladrillos KK 11H en muros clasificados como portantes y observar el comportamiento sísmico de los mismos. Asimismo, compararemos el comportamiento sísmico del muro con otros muros de ensayos anteriores, como es el caso de: muros de albañilería confinada con ladrillo KK 18 huecos y malla electrosoldada, muros con placas P-14, muros con ladrillos de concreto, etc. y se determinarán los beneficios de emplear ladrillos K 11H en la construcción de muros portantes.

Por último, se evaluará si la propuesta presentada en este proyecto de investigación es factible constructivamente en comparación con el uso de otras unidades de albañilería que también puedan ser empleadas en la construcción de muros portantes.

1.3. Estado del arte

Gallegos y Casabonne (2005) mencionan que el invento de la primera unidad de albañilería fue formada por el hombre de una masa de barro secada al sol, esta unidad de 15 Kg de peso fue encontrada en Jericó y se ha estimado que es del año 7350 a.C.

La creación del molde, utilizado para la elaboración de unidades de tierra denominadas actualmente adobe, se dio en Sumeria. Esto significó un gran avance en la construcción de albañilería, ya que gracias a estos moldes se facilitaba la producción de unidades iguales.

Posteriormente, el adobe fue llevado al horno en la ciudad de Ur (Sumeria) aproximadamente en el año 3000 a.C. y así se crearon los ladrillos de arcilla. Para las construcciones de albañilería se utilizaba este ladrillo y era asentado con mortero de betún o alquitrán, material abundante en el suelo del Medio Oriente.

La materia prima utilizada para la elaboración de unidades de albañilería dependía de las condiciones geológicas del lugar donde iba a ser empleada, por ello el ladrillo de arcilla se remonta a la ciudad de Sumeria, ya que había grandes depósitos de este material.

Por la misma época tanto en Egipto como en Grecia, el material más empleado era la roca, las unidades eran asentadas con morteros de yeso. En el caso de Egipto, sus construcciones eran revestidas con yeso y cal, mientras que en Grecia empleaban el mármol. Debido a que el material empleado en sus construcciones era la roca, había limitaciones en la forma de construir, la construcción era de forma rectilínea y no se podían elaborar arcos.

En el caso de Roma, se empleaban la piedra y también los ladrillos de arcilla en sus construcciones, a esta tecnología ellos añadieron su aporte, el cual fue el mortero de cemento y el concreto. El mortero de cemento puzolánico fue inventado por Vitruvio al combinar cal, agua y la arena volcánica del volcán Vesubio (actualmente denominado puzolana). Este mortero sirvió para asentar ladrillos y piedras en sus grandes construcciones, así también para elaborar concreto al agregar piedras. Los romanos con sus grandes invenciones generaron una gran revolución tecnológica de la construcción, el Panteón es uno de los frutos de la revolución del mortero y el concreto.

En el siglo XVIII, con la Revolución Industrial, se dio la invención del horno industrial, lo cual logró un gran aporte a la construcción, ya que se generaron plantas de fabricación de ladrillos de arcilla. En el caso de Perú, no se fabricaban ladrillos localmente sino eran traídos en barcos, por ello las construcciones eran de caña y adobe hasta inicios del siglo XX.

Posteriormente, Brunel (ingeniero británico) en el año 1825 aplica el uso de barras de hierro forjado en la construcción de un túnel bajo el río Támesis, generando la primera obra de albañilería reforzada. La investigación iniciada en los Estados Unidos en el año 1913 determinó mediante ensayos y evaluaciones teóricas características muy importantes de la albañilería reforzada y sentó las bases para la investigación realizada en los próximos años por diferentes países.

La albañilería confinada fue creada por ingenieros italianos, luego que el sismo de 1908 en Sicilia arrasara con varias viviendas de albañilería no reforzadas (San Bartolomé).

En nuestro país, la albañilería confinada ingresa después del terremoto de 1940; mientras que la albañilería armada hace su ingreso en la década del 60, a pesar que había sido inventada antes. Los primeros ensayos sobre elementos de albañilería en el Perú fueron realizados en la década de los 70 y los pocos resultados alcanzados hasta el año 1982, fueron utilizados para la elaboración del primer reglamento (Norma E.070). Posteriormente y hasta la actualidad se siguen desarrollando investigaciones las cuales nos brindan mayor información sobre el comportamiento de las estructuras, lo cual permite una mejor construcción y de esta manera se va actualizando la Norma de Albañilería vigente.

La albañilería se clasifica de dos maneras, por su función estructural y por la distribución del refuerzo.

Por su función estructural, se clasifica en:

- Muros no portantes: Aquellos que no reciben carga vertical, estos deben diseñarse para cargas perpendiculares a su plano, originadas por viento, sismo o alguna otra carga de empuje. Entre estos elementos tenemos a los parapetos, tabiques, cercos, etc. Los tabiques son generalmente hechos de albañilería debido a sus buenas propiedades térmicas, acústicas, resistentes, etc.
- Muros portantes: Son empleados como elementos estructurales, es decir están sujetos a cargas verticales y horizontales en su plano, así como a cargas perpendiculares a su plano.
- Muros no reforzados o de albañilería simple: Aquellos muros que no cuentan con refuerzo o teniéndolo no cumplen con las especificaciones mínimas reglamentarias que deberían tener. Estos tipos de muros presentan fallas muy frágiles ante terremotos, y por ello no deberían emplearse según la Norma E.070.
- Muros reforzados: Dentro de este tipo tenemos: Muro de albañilería armada, muro de albañilería de junta seca, muro laminar y muro de albañilería confinada.

- I. Muro de albañilería armada: Estos muros se caracterizan por llevar el refuerzo dentro de la albañilería, el refuerzo se encuentra distribuido a lo largo de la altura del muro como de su longitud. Generalmente para poder ubicar el refuerzo se utilizan unidades alveolares, por ello los alveolos deben ser llenados con concreto líquido para poder integrar el refuerzo y la albañilería.
- II. Muro de albañilería de junta seca: Son aquellos muros que no necesitan de mortero en las juntas horizontales ni verticales. Es decir, las unidades se apilan sin ningún tipo de mortero.
- III. Muro laminar: Este muro está compuesto de una placa delgada de concreto reforzado con una malla de acero central y por dos muros de albañilería simple que sirven como encofrados de la placa. Este tipo de muro no es empleado en Perú.
- IV. Muro de albañilería confinada: Este sistema es el más empleado en nuestro país, así como en toda Latinoamérica. Consiste en aquella albañilería compuesta en sus bordes de elementos de concreto armado (menos la base o cimentación, que generalmente es de concreto simple), los cuales son vaciados luego de haberse construido el muro. Las columnas, así como la viga solera actúan como arriostres del muro ante cargas sísmicas y brindan ductilidad al sistema. Primero debe construirse la albañilería y luego se da el vaciado de los elementos de concreto para que el muro sea capaz de soportar y transmitir cargas verticales, esta técnica constructiva permite una buena adherencia de todos los elementos con el muro, trabajando como un solo sistema.

Los muros de albañilería confinada como ya se mencionó, son los sistemas más utilizados en las construcciones en nuestro país. Es por ello que desde hace años y hasta ahora se siguen dando diversas investigaciones considerando diferentes unidades de albañilería. Se vienen realizando ensayos tratando de buscar un mejor comportamiento de las estructuras frente a sismos. A continuación, se mencionarán algunas de las tantas investigaciones realizadas.

En el año 2011 se realizó una investigación por los ingenieros Ángel San Bartolomé, Krishan Barr y César Pineda, la cual consistía en el control de la trituración de los

ladrillos huecos mediante malla electrosoldada en muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral cíclica.

Esta investigación buscó dar solución al problema de trituración de ladrillos huecos empleados en la construcción de muros portantes mediante la implementación de una malla electrosoldada recubierta con un tarrajeo de cemento para tratar de controlar en mayor grado el grosor de las grietas diagonales. Para ello, con fines comparativos, se construyeron dos muros confinados a escala natural con los mismos materiales, las mismas dimensiones y refuerzo en los confinamientos, con la única diferencia que en uno de estos muros se colocó una malla electrosoldada a ambas caras del muro. Ambos muros fueron ensayados a carga lateral cíclica y se obtuvieron las siguientes conclusiones, en el caso del muro 1 (muro sin malla electrosoldada) se pudo verificar lo que menciona la Norma E.070 respecto a que no se deben utilizar ladrillos huecos en muros portantes, ya que estos se trituraron inmediatamente después de haberse formado las grietas diagonales, causando una degradación de resistencia a fuerzas cortantes. En el caso del Muro 2 (muro con malla electrosoldada), el refuerzo adicional empleado incrementó el grosor efectivo del muro en 48%, lo cual hizo que incremente la resistencia a corte y modifique el tipo de falla, de una falla por cortante (Muro 1) a una falla por flexión (Muro 2).

En la investigación mencionada, las unidades de albañilería empleadas fueron ladrillos huecos, y un muro estuvo reforzado con malla electrosoldada. En el año 2009 los ingenieros Ángel San Bartolomé, Jonathan Paredes y David Caycho realizaron una investigación similar, ya que utilizaron ladrillos huecos, pero en el muro se adicionó refuerzo horizontal. Esta investigación consistió en la construcción de 2 muros de albañilería confinada, uno de estos muros sin refuerzo y el otro con refuerzo horizontal. A ambos muros se les realizó el ensayo de carga lateral cíclica con desplazamiento lateral controlado en 10 fases. Entre las conclusiones que se obtuvieron luego de los ensayos se tiene: las mejoras introducidas en el muro M2 (con refuerzo), permitieron incrementar la resistencia máxima en 20% y atenuar la degradación de resistencia. En el muro M1 se comprobó la disposición indicada en la Norma E.070 de no emplear ladrillos huecos en muros portantes, ya que la trituración de los ladrillos se inició en una etapa temprana, observándose una degradación de 25% de la resistencia para derivas de 0.004, menores que el valor máximo permitido por la Norma Sismorresistente E.030 que es 0.005. Cabe resaltar que mientras no se realicen otras investigaciones, donde se contemple el efecto dinámico de la carga sísmica y las

compresiones por carga vertical y flexión, se deberá utilizar ladrillos sólidos en aquellos pisos que durante los sismos severos se agrieten diagonalmente (falla por corte).

También se han realizado ensayos en otros tipos de unidades de albañilería, como es el caso de la investigación de los ingenieros Ángel San Bartolomé y Paola Angles en el año 2008, la cual consistió en la comparación del comportamiento a carga lateral cíclica de un muro confinado con ladrillos de concreto y otro con ladrillos de arcilla.

Esta investigación consistió en la comparación de propiedades físicas y mecánicas del ladrillo de concreto y el de arcilla mediante la construcción a escala natural de dos muros confinados para comparar su comportamiento bajo carga cíclica coplanar. Para efectos de comparación, ambos muros fueron construidos por la misma mano de obra, las mismas dimensiones y refuerzo. Al finalizar los ensayos, se concluyó que la resistencia al agrietamiento diagonal del muro MA (ladrillos de arcilla) fue 8% mayor que la del muro MC (ladrillos de concreto), debido a la mayor adherencia que tuvieron los ladrillos de arcilla con el mortero, también se obtuvo que las cargas máximas soportadas por ambos muros fueron similares.

Los ingenieros Aldo Pastorutti y Ángel San Bartolomé en el año 1985 realizaron ensayos a carga lateral en muros de albañilería confinados, para poder analizar los efectos que producían los refuerzos en cada uno de estos muros.

Se investigó el uso de refuerzo horizontal en muros de albañilería debido a que los elementos de confinamiento no resultan eficientes en la etapa de post-agrietamiento diagonal, especialmente en las zonas centrales del muro en donde el tamaño de las grietas es grande.

Para dicha investigación, se construyeron 4 muros con diferentes refuerzos y un muro patrón sin refuerzo. Estos muros se ensayaron a carga lateral cíclica y se pudo concluir lo siguiente: El refuerzo horizontal disminuyó, en etapas de grandes desplazamientos laterales, el deterioro de la albañilería y el de las columnas, a mayor refuerzo, originan más fisuras, pero éstas son a su vez más finas. Por último, se observó que es importante que el refuerzo horizontal se ancle en las columnas con un gancho de 90° para evitar la pérdida de anclaje cuando se genere fisuras por flexión en las columnas.

Se han mencionado ensayos realizados con muros de unidades de albañilería de arcilla, concreto, ladrillos huecos; sin embargo, en el año 2007 los ingenieros Harold Bolaños Luna y Miguel Ángel Moreno Alván realizaron una investigación en unidades sílico calcáreas denominadas placas P-14. Esta investigación consistió en la construcción de dos muros a escala natural, el primer muro fue de albañilería armada con refuerzo horizontal y vertical, el segundo muro tuvo las mismas características del primero pero se le reforzó con zunchos en los talones para confinarlos e incrementar la ductilidad. El objetivo principal fue el de analizar el comportamiento sísmico de los muros portantes P-14, por ello ambos muros fueron sometidos a carga lateral cíclica y a una carga vertical constante de 20 ton en ambos muros. El ensayo de carga lateral cíclica se realizó en 10 fases. En el caso del muro 1, se observó una degradación importante de resistencia a partir de la fase 9, mientras que para el muro 2 (muro con zunchos), esta degradación recién se presentó en la fase 10. Asimismo, el desplazamiento en el talón que sufrió el muro 1 llegó hasta 12 mm, mientras que en el muro 2 llegó a 6 mm.

Finalmente, otra de las conclusiones que se obtuvieron de la investigación, es que la resistencia máxima del muro 2 fue mayor que el muro 1 en un 5%, es decir, los zunchos de confinamiento empleados no incrementaron significativamente la resistencia del muro y sirvieron para darle mayor ductilidad, manteniendo la resistencia.

En esta investigación de tesis, se estudiará el uso del ladrillo sílico calcáreo King Kong 11H en muros clasificados como portantes. Para ello, se construyó a escala real un muro de albañilería confinada que fue sometido a carga lateral cíclica con control de desplazamiento.

CAPÍTULO 2: MATERIALES UTILIZADOS

2.1. Ladrillo sílico-calcáreo King Kong

El ladrillo sílico calcáreo KK 11H, es una unidad de albañilería compuesta de una mezcla de arena fina natural, cal hidratada y agua. Tiene la característica de que tiene 11 perforaciones circulares, las cuales no llegan a la cara de asiento superior (Fig. 2.1).

Para su fabricación, inicialmente los componentes son dosificados mediante un sistema moderno computarizado. Luego, cada uno de estos componentes son mezclados de forma homogénea gracias a una mezcladora de alta eficiencia. Seguidamente, los ladrillos son moldeados por compresión en una prensa automatizada. Después, los ladrillos son endurecidos a 13 bares de presión de vapor de agua y a 180 °C de temperatura en un proceso de autoclaveado, durante 9 horas. Por último, los ladrillos son colocados en parihuelas por una máquina empaletizadora automática, las cuales también pueden despacharse inmediatamente. Todo este proceso lo describe el fabricante, la Compañía Minera Luren.

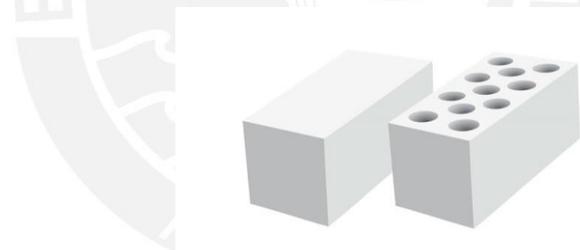


Figura 2.1 Ladrillo King Kong 11 H (Compañía Minera Luren, 2016)

2.2. Características del ladrillo King Kong 11H

Este tipo de ladrillo tiene ventajas tanto para el constructor como para el usuario final.

Entre las ventajas del uso de este ladrillo para el constructor indicadas por la Compañía Minera Luren tenemos:

- ✓ Clasificado como portante: ésta es una de las más importantes características del ladrillo KK 11H, presenta un área de huecos de 29% cumpliendo con el máximo de área de vacíos que indica la Norma E.070 que es 30% para unidades macizas o sólidas, que son aptas para la construcción de muros portantes.

- ✓ Alta adhesión de ladrillos: se tiene una alta adhesión de ladrillos debido a que su cara superior completa permite una mayor área de contacto con el mortero y su cara inferior con 11 huecos permite que el mortero pueda penetrar una altura de 1 a 1.5 cm, generando un engrampe mecánico.
- ✓ Menor espesor de tarrajeo: se puede tarrajar con un grosor máximo de 1 cm, de esta manera se puede ahorrar material (en otros casos, el grosor de tarrajeo es 2 a 4 cm).
- ✓ Variación dimensional reducida: este tipo de ladrillo presenta caras muy uniformes con casi ninguna imperfección.
- ✓ No necesita mojarse: este ladrillo se asienta seco, debido a que su porcentaje de absorción es moderada, entre 10-14%.

Entre las ventajas para el usuario final tenemos:

- ✓ Gran durabilidad: debido a que el material sílico calcáreo no contiene sales, entonces no existirán riesgos de eflorescencias que puedan afectar la adhesión ladrillo-mortero (caso de arcilla), por ello es muy resistente al intemperismo.
- ✓ Resistencia al fuego: resiste al fuego más de 4 horas y es el primer ladrillo en el Perú en tener una certificación por su resistencia al fuego.
- ✓ Economía en los acabados: al presentar bordes y aristas muy uniformes, se puede empastar y pintar directamente; y si se quiere colocar mayólicas no es necesario realizar un tarrajeo rayado.
- ✓ Alto aislamiento acústico: debido a su alta densidad, los muros construidos con este ladrillo tienen un alto índice de reducción acústica.
- ✓ Alta resistencia a compresión: el ladrillo KK 11H tiene una resistencia a compresión de $f'_{b \text{ promedio}} = 15 \text{ Mpa}$ (153 kgf/cm²).

En este proyecto de tesis, para todos los ensayos y construcciones realizadas en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas se utilizó el ladrillo King Kong 11H, producidos industrialmente por la Compañía Minera Luren S.A.

Se tienen las especificaciones técnicas de la Tabla 2.1:

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del ladrillo King Kong 11H (Compañía Minera Luren, 2016)

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Tipo	KING KONG 11H
% Huecos	29
Dimensiones	12.5x24x16cm
Peso	6.6 kg
Diámetro perforaciones	3.2cm

2.3. Ensayos clasificatorios en la unidad de albañilería

Los ensayos clasificatorios son pruebas a las que se someten las unidades de albañilería para poder limitar su aplicación en diseños estructurales.

La Norma E.070 nos menciona que por cada lote compuesto de hasta 50 millares de unidades se seleccione al azar una muestra de 10 unidades, sobre las cuales se desarrollarán las pruebas de variación de dimensiones y de alabeo. Luego, 5 de estas unidades se ensayarán a compresión y las otras a absorción.

2.3.1. Variación Dimensional

Para este ensayo se utilizaron 10 unidades de albañilería, un pie de rey y un bloque guía de mediciones. El ensayo consistió en medir las dimensiones de cada ladrillo en los puntos medios de las aristas que limitan las caras. Para cada una de las dimensiones, largo, ancho y altura, se tomaron cuatro medidas, las cuales luego fueron promediadas. Todas las medidas se realizaron con el pie de rey calibrado al milímetro y con la ayuda de un bloque guía de mediciones que nos proporcionó el LEADI (Laboratorio de Estructuras Antisísmicas, ver Fig. 2.2 y 2.3).

La variación dimensional en porcentaje se calcula con la siguiente fórmula:

$$v(\%) = \frac{100(Me - Mp)}{Me}$$

Donde:

M_e = Medida especificada por fabricante (mm)

M_p = Medida promedio (mm)



Figura 2.2 Herramientas empleadas para mediciones



Figura 2.3 Medición de unidades

Esta prueba es necesaria de ejecutar, ya que con ésta se puede determinar el espesor de las juntas y si es que se asumió el valor correcto de las mismas. Si la variación dimensional es muy grande, el espesor de junta será mayor y por ende la resistencia a compresión de la albañilería disminuirá, así como su resistencia al corte.

Los resultados que se obtuvieron fueron los indicados en la Tabla 2.2:

Tabla 2.2 Variabilidad de dimensiones del ladrillo King Kong 11H

Espécimen N°	Largo(mm)					Ancho(mm)					Altura(mm)				
	L1	L2	L3	L4	Lo	A1	A2	A3	A4	Ao	H1	H2	H3	H4	Ho
1	239.5	239.6	239.4	239	239.48	124.5	124.4	124.6	124.4	124.48	160.7	160.5	160.5	160.6	160.58
2	239.6	239.5	239.7	239	239.55	124.6	124.4	124.5	124.6	124.53	160.5	160.6	160.4	160.5	160.5
3	239.8	240.2	240	240	240	124.7	124.7	124.6	124.6	124.65	161.1	161.2	161.1	161.1	161.13
4	240.2	240.2	240.1	240	240.18	124.7	125	124.8	125.1	124.9	161.7	161.7	161.6	161.8	161.7
5	239.5	239.6	239.7	240	239.6	124.7	124.7	124.5	124.6	124.63	160.7	160.4	160.6	160.7	160.6
6	239.8	239.7	239.6	240	239.68	124.4	124.8	124.6	124.4	124.55	161	161.2	161	160.9	161.03
7	239.9	239.7	239.4	240	239.63	124.6	124.8	124.6	124.8	124.7	160.7	160.8	160.8	160.7	160.75
8	239.3	239.6	239.5	239	239.45	124.6	124.9	125	124.9	124.85	161	160.8	160.7	160.9	160.85
9	239.7	240	240	240	239.93	124.6	124.6	124.6	124.6	124.6	161.1	161	161.2	161.1	161.1
10	239.5	239.5	239.3	240	239.48	124.7	124.7	124.6	125	124.75	160.7	160.5	160.7	160.8	160.68
				Lp	239.7				Ap	124.66				Hp	160.89
				Le	240				Ae	125				He	160
				v(%)	0.13				v(%)	0.27				v(%)	-0.56

Como se puede observar, se obtuvieron porcentajes de variaciones de dimensiones menores a 1%. Según la Norma E.070, desde el punto de vista de variación dimensional, los ladrillos clasifican como clase V; asimismo debido a que dicho porcentaje es menor a 1% se podrán utilizar juntas de 1 a 1.5 cm.

2.3.2. Alabeo

Para este ensayo se utilizaron las mismas 10 unidades de albañilería que en el caso de la prueba de variación dimensional, también se empleó una regla metálica y una cuña. El ensayo consistió en colocar la superficie de asiento del ladrillo sobre una mesa plana, luego, se procedió a colocar una regla metálica que conecte los extremos opuestos en diagonal de la unidad, para después introducir la cuña en el punto de

mayor deflexión. Si la unidad es cóncava, se introduce la cuña en la zona que presente mayor flecha, y si la unidad es convexa es necesario acomodar la regla hasta que la medida de los extremos coincida, introduciendo luego la cuña. Este procedimiento se realizó en las dos caras de asiento (Fig. 2.4).



Figura 2.4 Colocación de la regla metálica y cuña para determinación del alabeo

Los resultados que se obtuvieron fueron los de la Tabla 2.3:

Tabla 2.3 Alabeos en ladrillo King Kong 11H

Especimen N°	CARA A		CARA B	
	Cóncavo	Convexo	Cóncavo	Convexo
	(mm)		(mm)	
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0

La tabla anterior nos muestra que los valores de alabeos obtenidos fueron cero. En muros de albañilería, el alabeo puede causar que las juntas horizontales presenten vacíos perjudicando la adherencia del mortero. Los resultados de este ensayo fueron satisfactorios para el buen desempeño del muro de albañilería.

2.3.3. Resistencia a la compresión

Para este ensayo se emplearon 5 ladrillos secos, a los cuales se les colocó un capping de yeso para poder uniformizar el contacto entre éstos y los cabezales de la máquina de compresión. Cabe recalcar que la resistencia a compresión expresa solo la calidad de la unidad ensayada, ya que el valor de f'_b depende de la altura de la probeta, del capping empleado y de la restricción de desplazamiento impuesto por los cabezales de la máquina de ensayos (Fig. 2.5 y 2.6).



Figura 2.5 Máquina de compresión



Figura 2.6 Unidades de albañilería luego de ensayo a compresión

La resistencia unitaria a compresión (fb) se mide como el valor de la carga de rotura dividida entre el área bruta. Según la Norma E.070, la resistencia característica ($f'b$) es el resultado promedio menos una desviación estándar. Al quitarle dicha desviación al valor promedio, esto nos da a entender que por lo menos el 84% de las unidades ensayadas tendrán una resistencia mayor al valor característico o que es aceptable tener un 16% de unidades que no cumplan esto.

$$fb = \frac{\text{Carga máx}}{\text{Abruta}}$$

$$f'b = fb - \sigma$$

Donde:

fb = Resistencia a compresión de la unidad

$f'b$ = Resistencia característica a compresión

σ = Desviación estándar

Los resultados que se obtuvieron luego de realizar el ensayo de compresión se muestran en las Tablas 2.4 y 2.5:

Tabla 2.4 Resultados de ensayo de compresión

Espécimen N°	Largo(mm)		Ancho(mm)		Espesor(mm)		Carga Máx (kN)	Área bruta (m ²)	fb (MPa)
	L1	L2	A1	A2	E1	E2			
1	239.8	239.7	124.4	124.8	161	161.2	431.5	0.029	14.88
2	239.9	239.7	124.6	124.8	160.7	160.8	431.3	0.029	14.87
3	239.3	239.6	124.6	124.9	161	160.8	364.1	0.029	12.56
4	239.7	240	124.6	124.6	161.1	161	453.8	0.029	15.65
5	239.5	239.5	124.7	124.7	160.7	160.5	385.8	0.029	13.3

Tabla 2.5 Resistencia a compresión y resistencia característica a compresión

fb	14.25	MPa
Desv.Est. (σ)	1.27	MPa
$f'b$	12.98	MPa

La resistencia a compresión promedio que se obtuvo es de 14.25 Mpa, es decir aproximadamente 145 kg/cm², y la resistencia característica que se obtuvo es de 12.98 Mpa (132 kg/cm²). De acuerdo a la Norma E.070, por el valor de la resistencia a compresión, el ladrillo sílico calcáreo 11H puede clasificarse como clase IV.

2.4. Ensayos no clasificatorios en la unidad de albañilería

Estos ensayos no son obligatorios de realizar, pero se efectúan con el fin de poder realizar un mejor proceso constructivo del muro.

2.4.1 Absorción

Para el ensayo de absorción se utilizaron 5 ladrillos, los cuales fueron secados al horno a una temperatura de 110°C por 24 horas para luego ser pesados en la balanza. Posteriormente los ladrillos son enfriados por 4 horas y luego se colocan en un recipiente lleno con agua destilada durante 24 horas (Fig.2.7), luego que se cumplen las horas indicadas, los ladrillos son retirados del recipiente y se procede a pesarlos (Fig.2.8).



Figura 2.7 Ladrillos secados al horno por 24 h



Figura 2.8 Ladrillos siendo pesados luego de permanecer 24 h en agua destilada

La absorción se halla como la relación entre diferencia entre el peso saturado y el peso seco, dividida entre el peso seco.

$$A(\%) = \frac{P_s - P_{seco}}{P_{seco}} \times 100$$

Donde:

A = Absorción

P_s = Peso saturado (N)

P_{seco} = Peso seco (N)

Los resultados obtenidos luego del ensayo de absorción se dan en la Tabla 2.6:

Tabla 2.6 Resultados de ensayo de absorción

Espécimen N°	Peso seco promedio (N)	Peso saturado (N)	Absorción(%)
1	65.33	74.51	14.05
2	65.39	74.63	14.13
3	67.23	76.25	13.40
4	68.67	77.35	12.64
5	65.93	75.05	13.82
		A(%)	13.61

El valor de absorción promedio que se obtuvo fue de 13.61 %, por ende, cumple con lo indicado en la Norma E.070, que para unidades sílico calcáreas la absorción no debe pasar de 22 %.

2.4.2 Succión

Para este ensayo se utilizaron 5 unidades de albañilería. Los especímenes fueron secados en el horno a una temperatura de 110° C y se pesaron a las 24 horas. Asimismo, se preparó una bandeja con agua (Fig.2.9 y 2.10) y sobre ésta se colocaron dos barras, las cuales sirvieron de apoyo para el ladrillo. Se colocaron los ladrillos sobre las barras y durante 1 minuto se llenó la bandeja con la finalidad de mantener el nivel de agua original. Luego se procedió a pesar cada unidad de albañilería húmeda.

La succión esta expresada en gramos por minuto en un área normalizada de 200 cm².



Figura 2.9 Bandeja para ensayo de succión



Figura 2.10 Ladrillos puestos a secar en máquina especial

Para determinar la succión se utilizará la siguiente fórmula:

$$S = 200x \frac{P_{suc} - P_{sec}}{\text{Área bruta}}$$

Donde:

S = Succión

P_{suc} = Peso (N) de la unidad luego de ser sumergida en agua durante 1 min

P_{sec} = Peso (N) de la unidad luego de permanecer en el horno.

Área Bruta = Ancho x Largo (cm²)

Los resultados del ensayo de succión se dan en la Tabla 2.7:

Tabla 2.7 Resultados de ensayo de succión

Espécimen N°	Largo (mm)	Ancho (mm)	Peso seco (N)	Peso saturado (N)	Succión (S)
1	238.3	123.8	67.24	67.69	31.18
2	238.5	123.4	66.89	67.33	30.58
3	238.5	123.5	66.80	67.04	17.11
4	238.9	123.9	66.78	67.05	18.92
5	239.1	124.6	67.40	67.80	26.85
					24.93

Se obtuvo un valor de succión promedio de 24.93 gr/ (200 cm²-min), lo cual está cerca al valor límite que nos indica la Norma E.070, que recomienda que el valor de succión se encuentre entre 10 y 20 gr/ (200 cm²-min). Cabe recalcar que el ladrillo King Kong 11 H se debe asentar en seco.

2.4.3. Área de huecos

Esta prueba se realizó en 10 unidades de albañilería. El ensayo consistió en llenar todos los agujeros del ladrillo con la denominada arena Ottawa. Luego se enrasó toda la arena sobre el ladrillo para poder eliminar la arena excedente (Fig. 2.11 y 2.12). Finalmente, toda la arena que se colocó en el ladrillo fue vaciada a una pipeta y se determinó la densidad para poder determinar su volumen. Este volumen se compara con el volumen total del ladrillo.

Para poder determinar el área de huecos se emplea la siguiente fórmula:

$$\%hucos = \frac{Varena \times 100}{Vunidad}$$

Donde:

V arena = volumen de arena en las perforaciones (cm³)

V unidad = largo x ancho x altura de la unidad (cm³)



Figura 2.11 Llenado de agujeros del ladrillo con arena Ottawa



Figura 2.12 Ladrillo luego que se enrasó la arena Ottawa

Se obtuvieron los resultados de la Tabla 2.8 luego de realizar la prueba de área de huecos:

Tabla 2.8 Área de huecos en unidades de albañilería

Espécimen N°	Vol Arena (cm ³)	Vol Unidad(cm ³)	% huecos
1	1145	4808	23.81
2	1151	4808	23.94
3	1155	4808	24.03
4	1159	4808	24.11
5	1158	4808	24.09
6	1162	4808	24.18
7	1153	4808	23.99
8	1154	4808	24.01
9	1161	4808	24.16
10	1158	4808	24.08
Densidad (gr/cm ³)	1.555	%huecos	24.04

Se puede observar que el porcentaje obtenido fue de 24.04%, el cual es menor a 30%, la Norma E.070 nos menciona que si el porcentaje de huecos es menor a 30% el ladrillo puede ser clasificado como una unidad sólida, por ello, es apto para la construcción de muros portantes.

2.5. Mortero

La función principal del mortero es adherir las unidades de albañilería corrigiendo las irregularidades que éstas presentan. Para unidades que deben asentarse secas como es el caso del ladrillo KK 11H, el mortero debe contener cal, ya que esta actúa como un aditivo evitando que la mezcla endurezca rápidamente.

El mortero de asentado a utilizar es el mortero grueso para muros portantes, el cual ya viene embolsado y la empresa productora es la Compañía Minera Luren. El mortero representa aproximadamente el 10% del área total del muro; sin embargo influye mucho en el comportamiento sísmico del mismo.

El mortero empleado es tipo "P2" en la Norma E.070 o tipo "S" en la NTP 399.610 y tiene dosificación de la Tabla 2.9:

Tabla 2.9 Dosificación para mortero (Compañía Minera Luren, 2016)

CEMENTO	CAL HIDRATADA	ARENA GRUESA
1	1/2	4

El peso aproximado de una bolsa es de 40 kg y el volumen correspondiente en m³ es de 0.0217 m³ por bolsa.

2.5.1. Ensayo de compresión del mortero

Este ensayo consiste en la preparación de probetas cúbicas de aproximadamente 5 cm de lado vaciadas en moldes metálicos y curadas durante 28 días en agua. Primero se vertió el mortero empleado para el asentado del muro de albañilería en 6 moldes metálicos. El mortero se colocó en dos capas, la primera capa se colocó a la mitad y con la ayuda de un pisón se procede a dar golpes perpendiculares al molde en cada celda, dando 32 golpes, en 2 series de 16 (Fig. 2.13 y 2.14). Luego se colocó la segunda capa y de la misma manera se apisonó realizándose 32 golpes.



Figura 2.13 Colocación del mortero en 6 moldes metálicos



Figura 2.14 Apisonado de mortero en cada capa vaciada

Finalmente, se dejan las probetas cúbicas por 24 horas, para después desmoldarlas (Fig. 2.15) y sumergirlas en una poza de agua por 28 días (Fig. 2.16), para luego retirarlas y ensayarlas.



Figura 2.15 Cubos desmoldados listos para ser sumergidos durante 28 días



Figura 2.16 Cubos sumergidos en agua destilada por 28 días

El fin de este ensayo solo es controlar la calidad del mortero medido a través de la dispersión de resultados, se debe obtener una dispersión menor al 30%.

La resistencia a compresión del mortero (f' mortero), se halla restando una desviación estándar (σ) al promedio de la muestra. La resistencia de cada probeta cúbica se halla dividiendo la carga de rotura entre el área bruta de la superficie de asiento.

Para hallar la resistencia a compresión del mortero se utilizarán las siguientes fórmulas:

$$\text{Resistencia probeta mortero}(R'\text{mortero}) = \frac{\text{Carga rotura}}{\text{Área}}$$

$$f'\text{mortero} = R'\text{mortero} - \sigma$$

Donde:

f' mortero= Resistencia a compresión del mortero (MPa).

R' mortero= Promedio de la resistencia a compresión del mortero de la muestra (MPa).

σ = Desviación estándar de la muestra (MPa).

El ensayo de compresión se realizó a los 28 días. Antes de ensayar las probetas de mortero, se secaron adecuadamente y se realizaron las medidas de sus dimensiones con la ayuda de un pie de rey (Fig.2.17).



Figura 2.17 Medición de dimensiones de cubos de mortero

Luego de ensayar las 6 probetas cúbicas de mortero se obtuvieron los resultados indicados en las Tablas 2.10 y 2.11:

Tabla 2.10 Resultados de ensayo de compresión de mortero

Probeta N°	Largo (mm)		Ancho (mm)		Espesor (mm)		Área (cm ²)	Carga máxima (kN)	R mortero (MPa)
	L1	L2	A1	A2	E1	E2			
1	45.70	45.40	49.10	49.10	49.20	49.50	22.44	32.52	14.49
2	50.20	50.50	49.20	49.20	49.30	49.40	24.70	35.56	14.40
3	51.10	53.00	49.40	49.20	49.60	49.30	25.24	36.64	14.52
4	48.70	49.00	49.80	48.80	49.30	49.20	24.25	33.84	13.95
5	46.30	48.80	50.50	49.80	46.30	49.20	23.38	33.88	14.49
6	46.50	49.20	49.00	48.80	49.20	49.30	22.79	34.18	15.00

Tabla 2.11 Resistencia a compresión y resistencia característica a compresión

R' mortero	14.47	(MPa)
Desv. Est.	0.33	(MPa)
f' mortero	14.14	(MPa)

La resistencia a compresión promedio que se obtuvo es de 14.47 MPa, y la resistencia característica que se obtuvo es de 14.14 MPa. Es conveniente que la resistencia a compresión del mortero y la unidad sean semejantes para poder evitar su falla por aplastamiento y tratar de dar homogeneidad a la albañilería.

2.6. Evaluación de resultados

Según los ensayos realizados, el ladrillo sílico calcáreo King Kong 11 H es clasificado como un ladrillo tipo IV, debido a que la variabilidad de sus dimensiones es menor al 1 %, no presenta alabeo y su resistencia característica a compresión es de 12.98 MPa.

Asimismo, el porcentaje de vacíos que presenta este tipo de ladrillo es menor al 30 %, por ello se comprobó que son aptos para la construcción de muros portantes y son clasificados como unidades sólidas.

El ladrillo King Kong 11 H cumple con la Norma E.070 y comparando los resultados de los ensayos con los valores especificados por el fabricante se tiene la Tabla 2.12:

Tabla 2.12 Especificaciones del fabricante vs Resultados de ensayos

Información	Dimensiones			Peso	% de huecos	f´b (MPa)	Absorción %	Succión gr/ (200 cm ² -min)
	Longitud (cm)	Ancho (cm)	Altura(cm)	(Kg)				
Datos ensayos	24	12.5	16.1	6.8	24.1	12.98	13.6	24.9
Datos fabricante	24	12.5	16	6.9	29	12.75	14	30
Diferencia	0.00%	0.00%	0.60%	-1.50%	-16%	1.80%	-2.90%	-17%

En el caso de la absorción, en el ensayo de laboratorio se obtuvo un valor de 13.6 % lo cual cumple la Norma E.070, ya que es menor a 22 % y también está en el rango indicado por el fabricante que es entre 10-14 %. Asimismo, para el caso del ensayo de succión se obtuvo un valor de 24.9 gr/ (200 cm²-min), en este caso el valor es cercano al máximo que indica la Norma E.070 que es de 20 gr/ (200 cm²-min), sin embargo sí se encuentra en el rango indicado por el fabricante que es entre 10-30 gr/ (200 cm²-min).

Con respecto a los valores obtenidos en el ensayo de compresión al mortero, se obtuvo una resistencia de compresión característica de 14.47 MPa, valor por encima a la resistencia característica obtenida en la unidad de albañilería (12.98 MPa). Es conveniente que ambas resistencias sean similares a fin de evitar fallas por aplastamiento y tratar de dar homogeneidad a la albañilería.



CAPÍTULO 3: PRISMAS DE ALBAÑILERÍA

Para conocer las propiedades de la albañilería simple y luego poder predecir el comportamiento y las fallas del muro a escala natural, es que se realiza la construcción de pilares y muretes compuestos de ladrillos KK 11H.

3.1. Pilas

Estos especímenes deben ser pequeños, fáciles de almacenar y manipular para montarlos en el equipo de ensayo. La cantidad de pilas a ensayar se encuentra reglamentada en la Norma E.070 y depende de la magnitud de la obra. Estas pilas deben ser ensayadas a los 28 días como indica la Norma E.070, pero también pueden ser ensayadas a 14 días con el fin de que puedan representar la falla que presentará el muro a construir en escala real. En esta investigación, se ensayaron todas las pilas a 28 días.

Se construyeron 3 pilas cada una conformada por 4 ladrillos KK 11H, se consideró un espesor de mortero de 1 cm y la altura de cada unidad de albañilería es de 16 cm, por ello, cada pila tiene una altura de 67 cm y un ancho de 24 cm (Fig. 3.1).

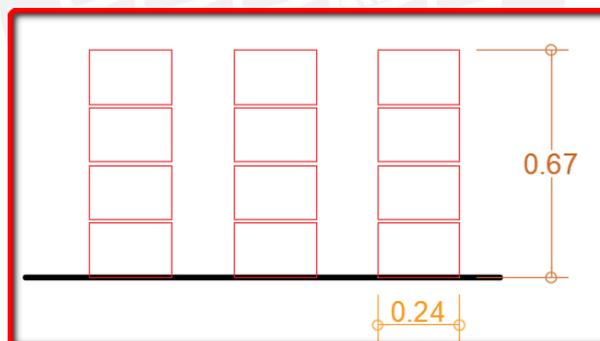


Figura 3.1 Pilas con ladrillo KK 11H, considerando mortero de 1 cm

3.1.1. Procedimiento de construcción

Se construyeron 3 pilas con ladrillo sílico calcáreo 11 H, la construcción fue rápida, de tal manera que todas las pilas se asentaron el mismo día. Se apilaron 4 unidades de albañilería una encima de otra y se controló la altura con un escantillón y la verticalidad con un nivel y una plomada. Como ya se mencionó, se utilizó una junta de mortero de 1 cm, y las unidades sílico calcáreas se asentaron secas (Fig.3.2).



Figura 3.2 Construcción de pilas

Luego de la construcción de las pilas, generalmente se coloca un capping de yeso en la parte superior e inferior de cada pila para poder uniformizar la superficie de contacto de cada espécimen con el dispositivo del ensayo de compresión axial, pero en este caso gracias a la gran uniformidad de los ladrillos 11H, no se tuvo que colocar capping, solo se colocaron dos planchas de triplays al momento de colocar las pilas en la máquina de ensayo.

El ensayo de compresión axial se realizó pasando 28 días de la construcción de las tres pilas.

3.1.2. Montaje e instrumentación

El dispositivo encargado de realizar el ensayo de compresión axial en las pilas consiste de una gata hidráulica de 200 ton, una celda de carga y una bomba hidráulica eléctrica de 600 BAR de capacidad. La velocidad elegida para los ensayos fue de 50 kN/min y se pudo determinar la fuerza en cada instante a través del programa LABVIEW.

Antes de realizar el ensayo se colocaron 2 dispositivos de medición de desplazamientos (LVDTs), uno global; el cual registraba los desplazamientos de los cabezales, y uno local el cual se colocó en una de las caras de la pila, ambos fueron empleados para poder determinar el desplazamiento axial (Fig. 3.3).



Figura 3.3 Instrumentación en pilas

3.1.3. Cálculo de la resistencia a compresión axial

La resistencia a compresión axial (f_m) de las pilas se calcula luego de obtener los valores de carga máxima y se halla de la siguiente manera:

$$f_m = \frac{P_{m\acute{a}x}}{A_{bruta}}$$

Donde:

f_m = Resistencia a compresión axial (MPa)

$P_{m\acute{a}x}$ = Fuerza máxima que resiste la pila (kN)

A_{bruta} = Área bruta transversal a la fuerza (cm²)

Luego, este valor debe ser corregido por el factor de esbeltez de la pila. La esbeltez se halla como la relación entre la altura de la pila y su espesor (menor dimensión de la sección transversal). A cada valor de esbeltez le corresponde un factor tal y como indica la tabla 3,1:

Tabla 3.1 Factores de corrección de $f'm$ por esbeltez (SENCICO, 2006)

Esbeltez	2.0	2.5	3.0	4.0	4.5	5.0
Factor	0.73	0.80	0.91	0.95	0.98	1

La resistencia característica a compresión de la pila ($f'm$) se obtiene al restar a la resistencia promedio la desviación estándar obtenida.

$$f'm = fm - \sigma$$

Donde:

$f'm$ = Resistencia característica a compresión (MPa)

fm = Resistencia a compresión (MPa)

σ = Desviación estándar

A continuación, se muestra la Tabla 3.2 con los resultados obtenidos:

Tabla 3.2 Resistencia a la compresión de pilas.

	Dimensiones			Esbeltez	Pmáx (kN)	Área cm ²	fm MPa	Factor Corrección	fm corregido MPa
	Largo (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)						
Pila 1	240	125	665	5.32	440	300	14.7	1	14.7
Pila 2	240	125	665	5.32	338	300	11.3	1	11.3
Pila 3	240	125	665	5.32	447	300	14.9	1	14.9
								fm:	13.6
								σ	2.04
								$f'm$	11.6

En el caso de todas las pilas ensayadas se obtuvo un valor de esbeltez de 5.32, el cual es un valor alto, ya que la Norma E.070 adopta como esbeltez estándar el valor de 5. Este valor de esbeltez afecta el valor obtenido de resistencia característica e influye en las formas de falla de las pilas. Además, el comportamiento y el tipo de falla de pilas ante cargas axiales están determinados por la interacción entre las caras de asiento de los ladrillos y el mortero.

En la Fig.3.4 se muestran las fallas de las 3 pilas ensayadas:



Figura 3.4 Fallas en pilas

En todos los casos la falla se dio por tracción debido a la expansión lateral causada por la compresión aplicada y por el efecto de pandeo ocasionado por la esbeltez de las pilas, lo cual generó el desprendimiento completo de las unidades de albañilería y el desprendimiento de sus caras logrando el colapso total de las pilas.

3.1.4. Cálculo del Módulo de elasticidad (E_m)

El módulo de elasticidad se halla empleando la gráfica Fuerza vs Desplazamiento. En dicha gráfica se debe ubicar un tramo cuya pendiente represente el comportamiento elástico de la pila. Al dividir el incremento de esfuerzo axial ($\Delta\sigma$) entre la deformación unitaria ($\Delta\varepsilon$) en el tramo mencionado se obtendrá el valor de E_m .

Esfuerzo axial

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta P}{A}$$

Donde:

$\Delta\sigma$ = Esfuerzo axial (KPa)

ΔP = Fuerza en tramo elástico (kN)

A = Área bruta (m²)

Deformación unitaria

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta D}{L}$$

Donde:

$\Delta\varepsilon$ = Deformación unitaria asociada a ΔP

ΔD = Desplazamiento en el rango elástico (mm)

L = Longitud entre las bases de los LVDT (mm)

Módulo de elasticidad

$$Em = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

La relación entre la carga y el desplazamiento de las pilas se muestra a continuación en los siguientes gráficos (Fig.3.5):

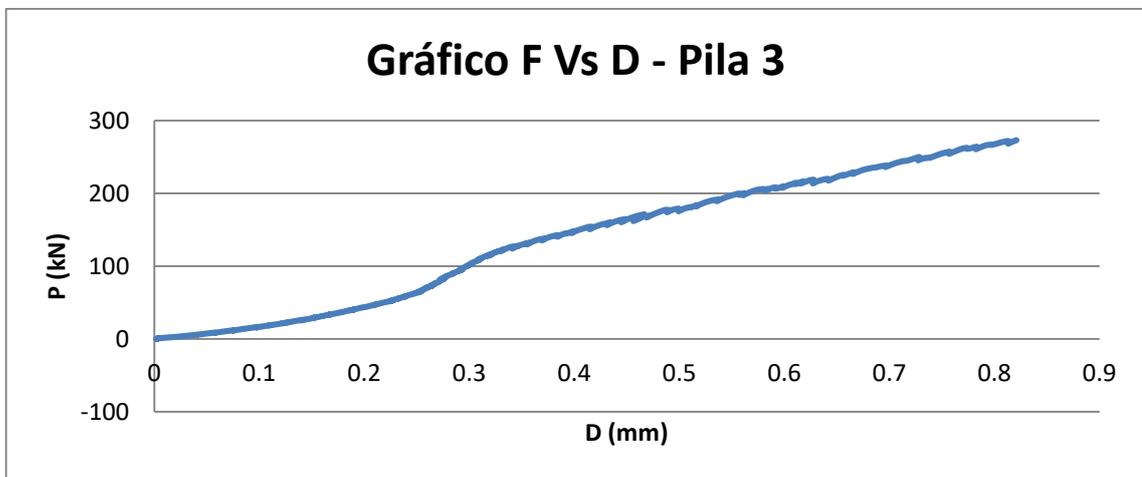
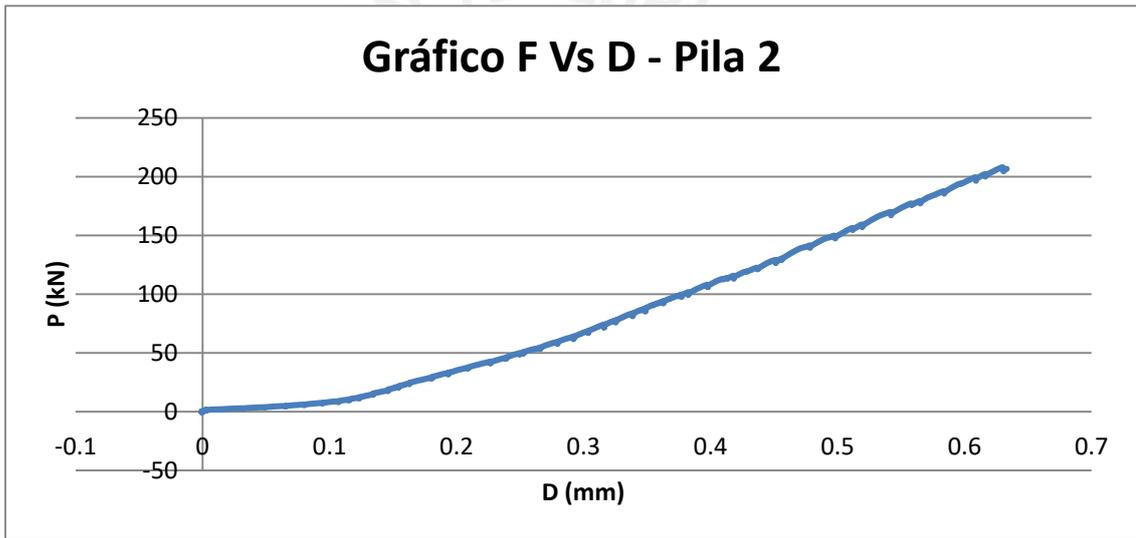
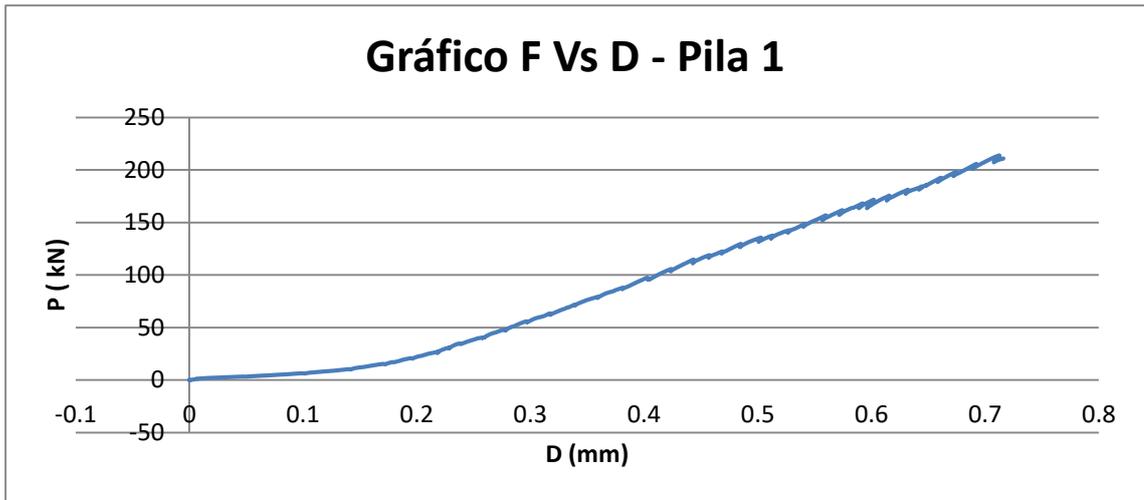


Figura 3.5 Gráficas Fuerza Vs Desplazamiento en las 3 pilas

Los resultados finales se muestran en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3 Módulo de Elasticidad de pilas

Pilas	Distancia LVDT (mm)	Punto 1		Punto 2		Deformación Unitaria	σ_1	σ_2	Em	
		P (kN)	D (mm)	P (kN)	D (mm)	ϵ	(KPa)	(KPa)	(MPa)	
Pila 1	510	67.33	0.329	201.8	0.685	0.0007	2244.3	6727.7	6.4E+03	
Pila 2	510	52.00	0.256	154.9	0.508	0.0005	1733.3	5161.7	6.9E+03	
Pila 3	515	68.42	0.257	205.2	0.580	0.0006	2280.7	6838.3	7.3E+03	
									Em prom	6.9E+03
									Desviación (σ)	4.3E+02
									Em caract.	6.5E+03

3.2. Muretes

Los muretes al igual que los prismas, deben ser especímenes fáciles de transportar y almacenar. Estos elementos deben ser de forma cuadrada con lados iguales a 60 cm aproximadamente para muretes hechos con ladrillos según indica la Norma E.070. Con las dimensiones del ladrillo King Kong 11 H se consideró para esta investigación la construcción de muretes de 67 cm de lado (Fig.3.6). Se construyeron 3 muretes, cada uno con las mismas dimensiones y en todos se usó juntas de mortero de 1cm.

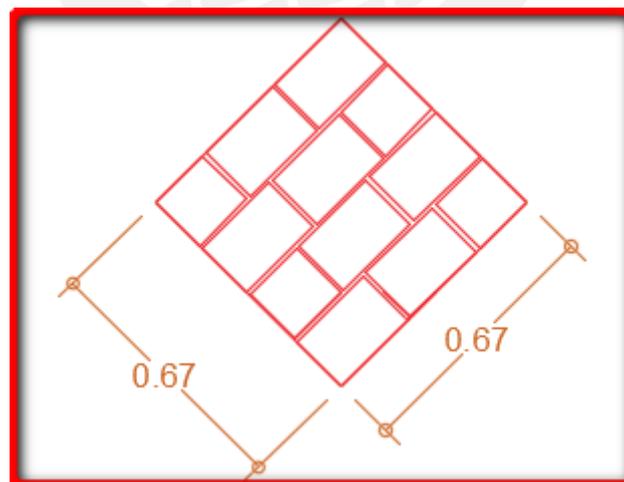


Figura 3.6 Murete de 67x67 cm

Cada murete contiene aproximadamente 12 ladrillos KK 11H y para todos los muretes construidos se utilizaron las mismas condiciones.

3.2.1. Procedimiento de construcción

La construcción de los muretes fue de manera rápida al igual que las pilas, se colocó una primera hilada de 3 ladrillos 11 H conocidos como ladrillos maestros, ya que estos definen la longitud del murete y la verticalidad del mismo (Fig.3.7). En la segunda hilada se comenzó el asentado con un ladrillo de 17 cm y luego dos ladrillos completos, se decidió esa medida buscando la simetría del murete y tomando en cuenta que cada lado debía medir cerca de 60 cm. Sucesivamente se fueron asentando las dos últimas hiladas, se utilizó una plomada para asegurar la verticalidad de los especímenes (Fig. 3.8).



Figura 3.7 Colocación de ladrillos maestros en los 3 muretes



Figura 3.8 Muretes de ladrillo KK 11

Posteriormente a la construcción de los muretes, se les suele colocar un capping de yeso en las esquinas opuestas con la finalidad de uniformizar el contacto entre los especímenes y los cabezales del dispositivo de ensayo. Sin embargo, al tratarse de ladrillos muy uniformes, al igual que en el caso de las pilas, se emplearon dos planchas de triplays colocados en las superficies de contacto.

El ensayo se efectuó pasando 28 días terminado la construcción de los muretes.

3.2.2. Montaje e instrumentación

Para el ensayo de los muretes se utilizó una gata hidráulica y una celda de carga con capacidad de 50 ton. La velocidad empleada en el ensayo fue de 1 ton/min y antes de realizar el ensayo se colocaron dos dispositivos de medición de desplazamientos LVDTs para medir los desplazamientos en las diagonales, para posteriormente determinar el módulo de corte de la albañilería.

3.2.3. Cálculo de la resistencia al corte

La resistencia unitaria a corte puro de un murete (vm) se obtiene dividiendo la carga de rotura entre el área bruta de la diagonal cargada (Área diagonal= Dxt), sin importar que la unidad de albañilería sea hueca o sólida. Si la edad de los muretes es distinta a 28 días, se utiliza el factor de corrección indicado en la Tabla 8 de la Norma E.070.

Resistencia al corte

$$vm = \frac{Pmáx}{Ad}$$

Donde:

vm = Resistencia al corte (MPa)

$Pmáx$ = Carga máxima aplicada (kN)

Ad = Área diagonal (Diagonal murete x espesor) cm^2

Una vez ensayados todos los muretes, se obtiene el valor promedio (vm) y la desviación estándar (σ) de la muestra ensayada, para luego evaluar según la Norma E.070 la resistencia característica al corte restando al valor promedio dicha desviación.

$$v'm = vm - \sigma$$

Dónde:

$v'm$ = Resistencia característica al corte (MPa)

vm = Resistencia al corte (MPa)

σ = Desviación estándar

Los resultados obtenidos para los 3 muretes ensayados se muestran a continuación en la Tabla 3.4:

Tabla 3.4 Resistencia al corte de muretes

Murete	Dimensiones			Diagonal (cm)	Área (cm ²)	Carga de rotura (kN)	vm (MPa)
	Largo (cm)	Ancho (cm)	Espesor (cm)				
Murete 1	67.0	67.0	12.5	94.75	1184	115.72	0.98
Murete 2	67.0	67.0	12.5	94.75	1184	148.08	1.25
Murete 3	67.0	66.5	12.5	94.40	1180	134.35	1.14
						vm prom	1.12
						Desv.est.	0.14
						$v'm$	0.98

La resistencia al corte puro y la forma de falla dependen mucho del grado de adherencia entre la unidad de albañilería y el mortero. Los resultados obtenidos nos ayudan a predecir la resistencia a fuerza cortante y la forma de falla que tendrán los muros a escala natural.

En la Fig. 3.9 se muestra la falla típica de los 3 muretes ensayados:



Figura 3.9 Falla típica en muretes

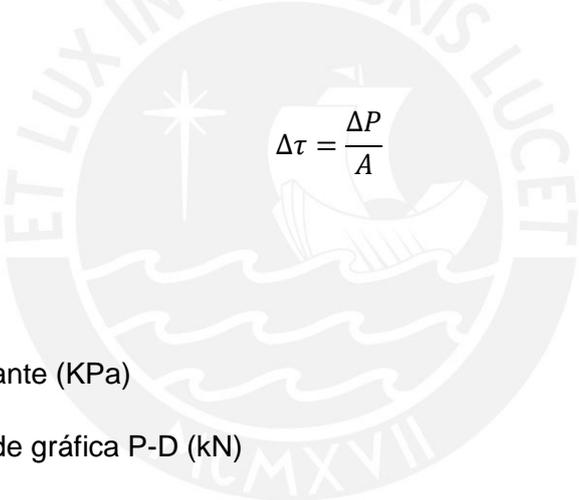
La falla obtenida para los 3 muretes fue la adecuada, ya que las grietas atravesaron tanto al ladrillo como al mortero; en ningún caso se obtuvo una falla escalonada que corta solo al mortero y por ende se demuestra la buena adherencia entre el mortero y la unidad de albañilería.

3.2.4. Cálculo del módulo de corte (Gm)

Con los resultados obtenidos de los ensayos, se construyeron las gráficas Fuerza Vs Desplazamiento de cada murete y se identificaron los tramos que representan el comportamiento elástico de cada uno.

El módulo de corte se halla dividiendo el incremento de esfuerzo cortante ($\Delta\tau$) entre la deformación angular ($\Delta\gamma$), la cual se obtuvo sumando las deformaciones unitarias registradas en cada diagonal.

Esfuerzo cortante


$$\Delta\tau = \frac{\Delta P}{A}$$

Donde:

$\Delta\tau$ = Esfuerzo cortante (KPa)

ΔP =Fuerza lineal de gráfica P-D (kN)

A =Área bruta de diagonal cargada (m²)

Deformación unitaria

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta D}{L}$$

Donde:

$\Delta\varepsilon$ =Deformación unitaria relacionada a ΔP de cada LVDT

ΔD =Desplazamiento en el rango elástico (mm)

L =Distancia entre las bases de los LVDT

Deformación angular

$$\gamma = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$$

Dónde:

γ = Deformación angular

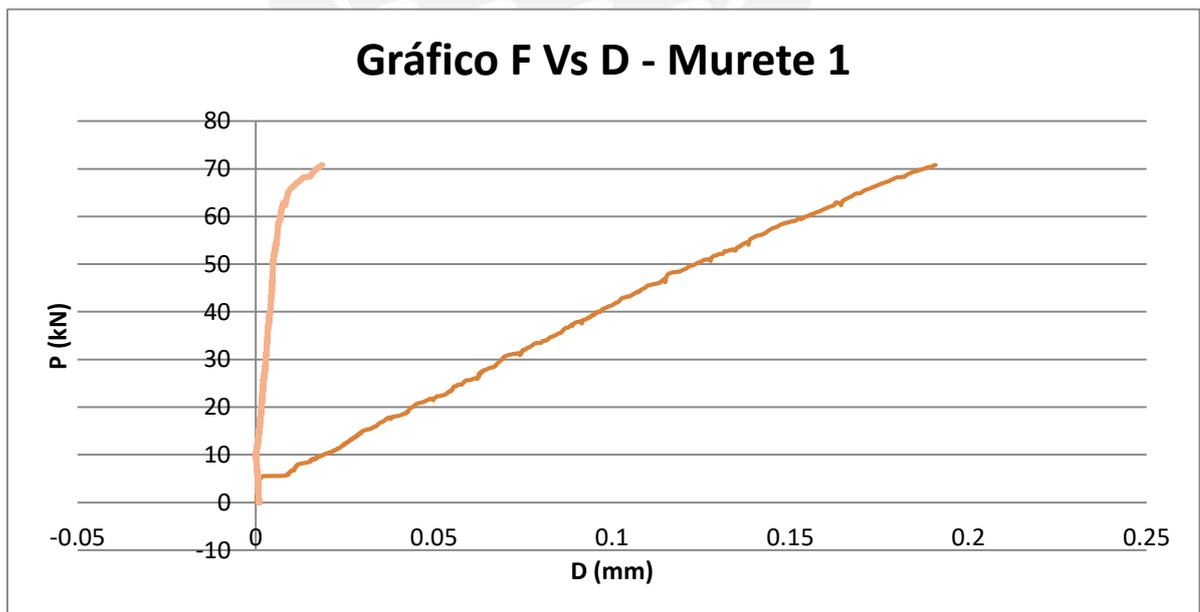
ε_1 =Deformación unitaria registrada en el primer LVDT

ε_2 =Deformación unitaria registrada en el segundo LVDT

Módulo de corte (Gm)

$$Gm = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

La relación entre la carga y el desplazamiento de los muretes se muestra a continuación en los siguientes gráficos (Fig. 3.10):



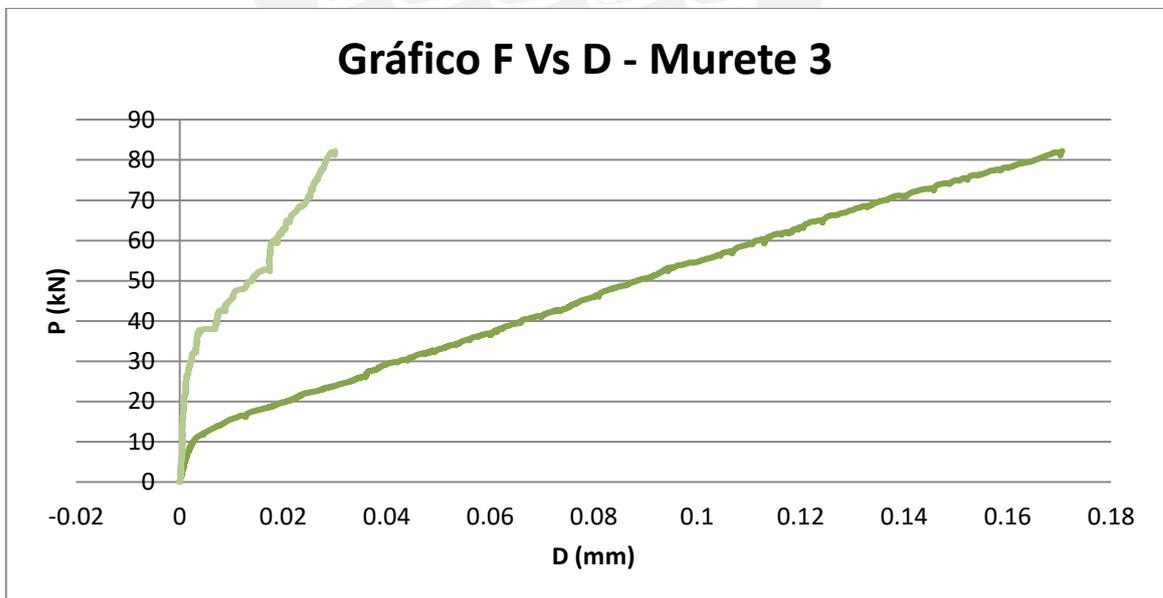
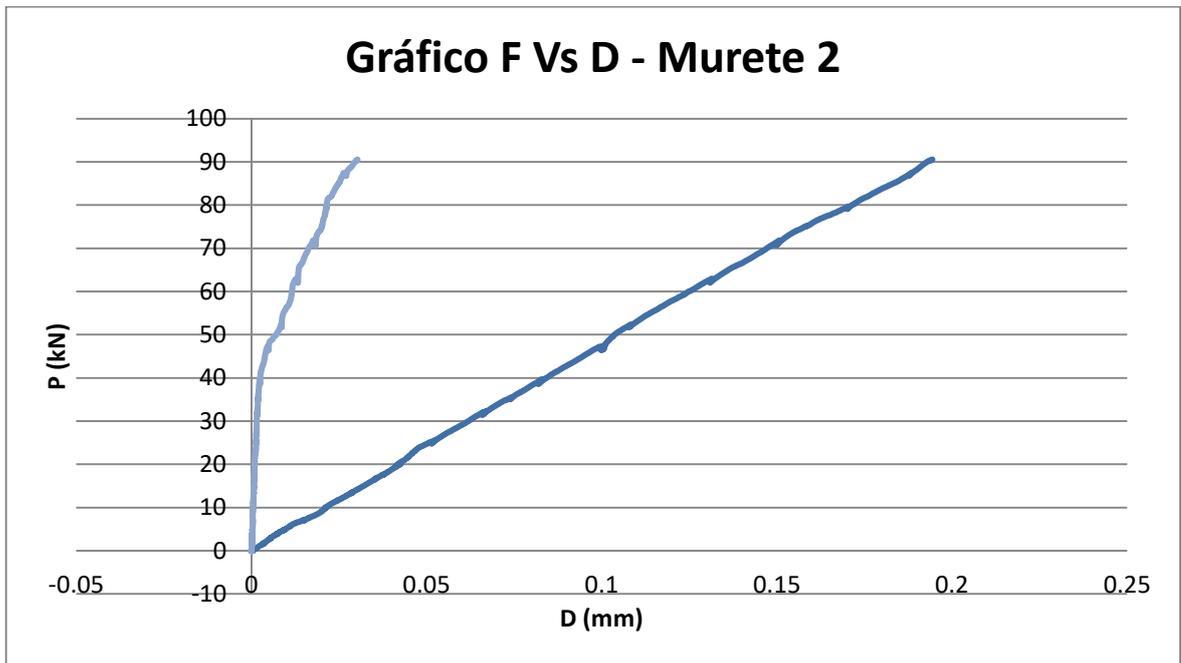


Figura 3.10 Gráficos Fuerza Vs Desplazamiento en los 3 muretes

Los resultados obtenidos aparecen en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5 Módulo de corte

Murete	L (mm)	Punto 1		Punto 2	
		P1 (kN)	D1 (mm)	P2 (kN)	D2 (mm)
Murete 1 hor	580	35.43	0.003	70.81	0.019
Murete 1 vert	575	35.43	0.085	70.81	0.191
Murete 2 hor	580	45.35	0.004	90.58	0.030
Murete 2 vert	575	45.35	0.095	90.58	0.194
Murete 3 hor	585	41.13	0.007	82.23	0.030
Murete 3 vert	580	41.13	0.070	82.23	0.171

Murete	ϵ_h	ϵ_v	$\Delta y = \epsilon_1 + \epsilon_2$	τ_1 (KPa)	τ_2 (KPa)	$\Delta \tau$ (KPa)	$G = \Delta \tau / \Delta y$ (MPa)
1	0.00003	0.00018	0.00021	299.145	597.868	298.723	1.42E+03
2	0.00005	0.00017	0.00022	382.902	764.792	381.889	1.75E+03
3	0.00004	0.00017	0.00021	348.559	696.864	348.305	1.64E+03
Gprom							1.60E+03
Desv.est.							1.70E+02

3.3. Evaluación de resultados

En conclusión, luego de realizar los ensayos en las pilas, la resistencia característica a compresión axial (f'_m) obtenida fue de 11.6 MPa y el módulo de elasticidad (E_m) obtenido fue de 6.9E+03 MPa.

Para analizar la resistencia se debe considerar que la Norma E.070 relaciona los valores de f'_m y E_m de la siguiente manera para unidades sílico-calcáreas:

$$E_m = 600 f'_m$$

En la tabla 3.6 se puede observar que la relación E_m/f'_m experimental es ligeramente menor a lo indicado en la Norma E.070.

Tabla 3.6 Relación del Módulo de Elasticidad Vs $f'm$

Unidad de albañilería	$f'm$ ensayo	Em ensayo	Em/ $f'm$	Relación según Norma E.070	Diferencia con valor teórico Norma E.070 (%)
Ladrillo sílico-calcáreo	(MPa)	(MPa)			
	11.57	6.9E+03	594	600	-1%

En el caso de los muretes, la resistencia característica al corte puro ($v'm$) obtenida fue de 0.98 MPa y el módulo de corte (G_m) obtenido fue de 1.60E+03 MPa.

Cabe resaltar que para fines de diseño, el valor obtenido de $v'm$ no debe exceder el valor de $\sqrt{f'm}$. En la tabla 3.7 se puede observar que se cumple lo mencionado anteriormente, ya que $10.04 \text{ kg/cm}^2 < 11 \text{ kg/cm}^2$.

Tabla 3.7 Análisis de la resistencia al corte

Unidad de albañilería	$v'm$ ensayo	$f'm$ ensayo	$v'm$ max	$v'm$ diseño
			$\sqrt{f'm}$	
Ladrillo sílico-calcáreo	(MPa)	(MPa)	(MPa)	(MPa)
	0.98	11.57	3	0.98

CAPÍTULO 4: CONSTRUCCIÓN DEL MURO DE ALBAÑILERÍA SÍLICO CALCÁREA

4.1. Características del muro

Se construyó un muro de albañilería a escala natural, el cual estaba confinado por una viga solera, dos columnas de confinamiento y una viga de cimentación.

Las características del muro son las siguientes:

-La albañilería fue construida utilizando un aparejo de soga.

-Se consideró un mortero de 1 cm, tanto para junta vertical como horizontal.

-La Norma E.070 permite una conexión de muro-columnas de confinamiento dentada o al ras. Para la presente investigación la unión de las columnas y el muro será al ras, por ello será necesario colocar mechas embutidas 40 cm en el muro y 12.5 cm en la columna, para luego doblarlas verticalmente 10 cm.

-Dimensiones de la albañilería (Fig. 4.1)

- Altura: 2.37 m - Longitud: 2.37 m - Espesor: 0.125

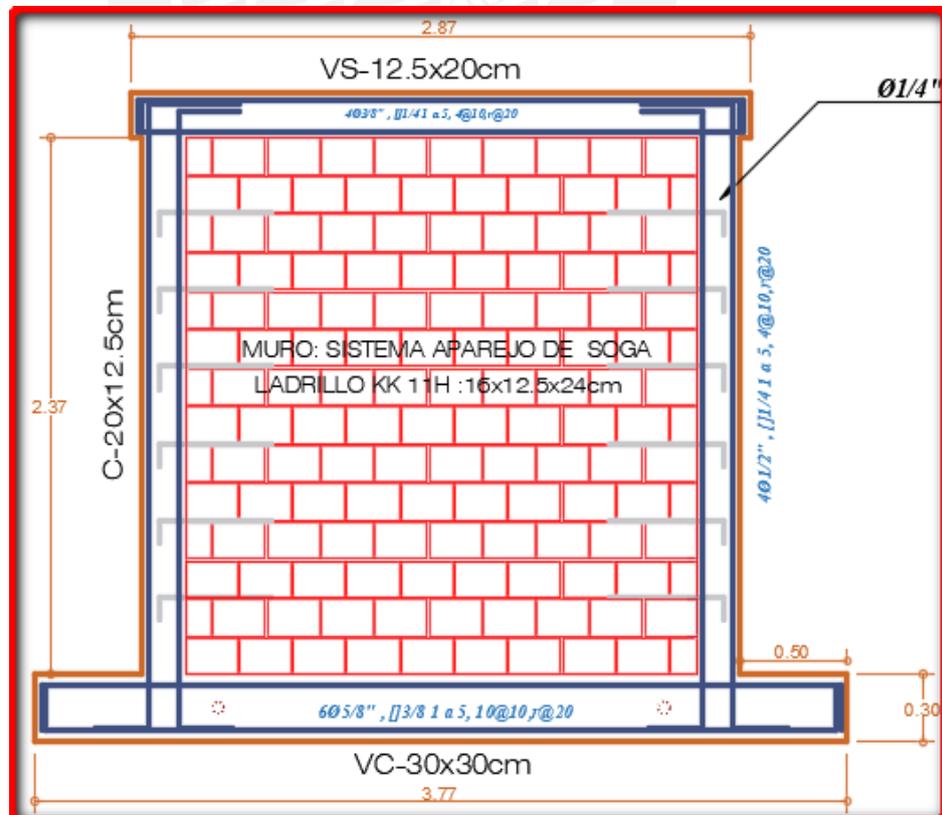


Figura 4.1 Muro de albañilería confinada sílico calcárea

4.2. Verificación de los refuerzos colocados

El refuerzo de los elementos de confinamiento utilizado cumplió con los requisitos mínimos indicados en la Norma E.070.

-Para calcular el acero mínimo en las columnas de confinamiento se utilizó la siguiente fórmula:

$$A_s = \frac{0.1 * (f^c) * A_c}{f_y} = 1.13 \text{ cm}^2$$

Donde:

f^c = Resistencia del concreto, para esta investigación se empleó concreto de 20.59 MPa (210 Kg/cm²).

A_c = Área de columna: 20 x 13 cm.

f_y = Fluencia del acero 411.8 MPa (420 kg/cm²).

El acero que se utilizó en las columnas fue de: $4\phi 1/2'' = 5.16 \text{ cm}^2$, este valor es mayor a 1.13 cm² por lo cual el refuerzo a utilizar es correcto.

-Para calcular el acero mínimo en la viga solera se utilizó la misma fórmula que en el caso de las columnas y nos dio el mismo valor, dado que los materiales y la sección en ambos casos fueron los mismos:

$$A_s = \frac{0.1 * (f^c) * A_c}{f_y} = 1.13 \text{ cm}^2$$

El acero utilizado en la viga solera fue : $4\phi 3/8'' = 2.84 \text{ cm}^2$, este valor es mayor a 1.13 cm² por lo cual el refuerzo a utilizar es correcto, ya que supera el acero mínimo.

4.3. Construcción de la viga de cimentación

Esta viga es necesaria de construir para poder anclar el refuerzo vertical de las columnas y para poder fijar al muro sobre la plataforma de ensayos, evitando de esta manera su volcamiento y deslizamiento cuando se le aplique la carga lateral cíclica.

Las características de la viga de cimentación son las siguientes (Fig. 4.2):

- Se utilizó para la viga de cimentación un concreto de 20.59 MPa (210 kg/cm²).
- Dimensiones:
Largo= 3.77 m

Ancho= 0.30 m

Peralte= 0.30 m

- El acero de refuerzo utilizado es el siguiente: $6\phi 5/8"$, $\square 3/8"$ 1 a 5, $10@10, r@20$.

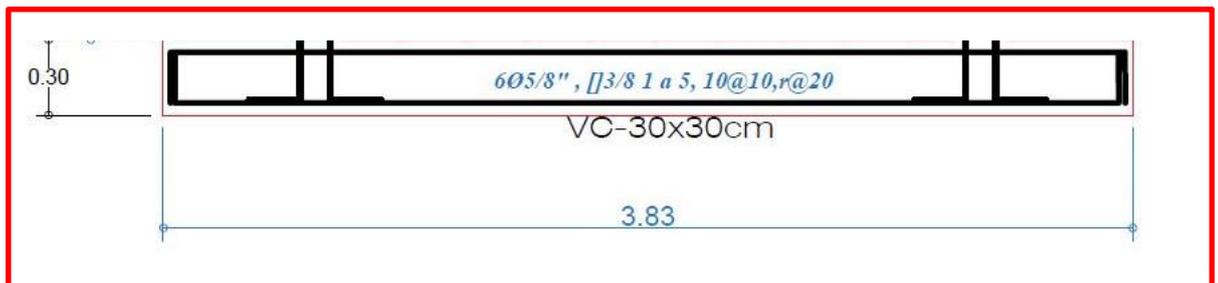


Figura 4.2 Refuerzo utilizado en Viga de cimentación

El inicio de la construcción de la viga de cimentación se inició con la habilitación de acero. Luego de tener los estribos listos y las longitudes de acero necesarias, se procedió a armar la viga sobre una base de madera y con el alambre N°16 se amarró el acero de las columnas de confinamiento (Fig.4.3).

Antes de encofrar la viga de cimentación, se colocaron dos tubos de PVC de 4 pulgadas, para que al término de la construcción, el muro pueda ser transportado con el equipo de izaje.



Figura 4.3 Armado de viga de cimentación

El vaciado de la viga de cimentación se realizó luego de 3 días de su armado, la resistencia del concreto que se utilizó fue de 210 kg/cm^2 . El día del vaciado y antes

que fraguara el concreto, se hizo unas rayas en la zona de asentado del ladrillo (Fig. 4.4). Se sacaron 3 probetas del vaciado de la viga (Fig. 4.5) y al día siguiente del vaciado, se procedió a retirar el encofrado.



Figura 4.4 Vaciado de viga de cimentación



Figura 4.5 Probetas de viga de cimentación

La resistencia del concreto a los 28 días de edad se muestra en la Tabla 4.1:

Tabla 4.1 Resistencia de probetas de viga de cimentación

Especimen	Diámetro		Carga Máxima (kN)	Área (cm ²)	σ (MPa)
	D1 (mm)	D2 (mm)			
Probeta 1	152.0	152.0	657.6	181.46	36.24
Probeta 2	151.2	152.0	678.1	180.51	37.57
Probeta 3	151.6	151.1	646.6	179.91	35.94
				Promedio	36.58

Como se puede observar en la tabla, todas las probetas sobrepasaron la resistencia de 20.59 MPa (210 Kg/cm²), se obtuvo una resistencia promedio de 36.58 MPa.

4.4. Construcción del muro de albañilería

Luego del desencofrado de la viga de cimentación, se procedió con la construcción del muro. Los ladrillos sílicos calcáreos se asientan secos, por ello solo se les limpió del polvo antes de asentar.

Para poder asentar la primera hilada de ladrillos, se tuvo que marcar la medida de las columnetas para poder determinar a partir de donde se deberían de asentar los ladrillos. En cada fila se asentaron 10 ladrillos, 9 completos y uno a la mitad (Fig. 4.6).



Figura 4.6 Delimitación de primera hilada de ladrillos

El mortero empleado para apilar los ladrillos es el mortero grueso para muro portante P2. Para poder determinar que la mezcla tiene una adecuada cantidad de agua, y por ende asegurar su consistencia y trabajabilidad, se realizó la prueba de la plancha, la cual consiste en levantar con la plancha el mortero, voltearla y el mortero debe quedar suspendido unos segundos y luego caer (Fig. 4.7).



Figura 4.7 Realización de la prueba de la plancha

El asentado de los ladrillos se realizó en dos etapas, el primer día se asentó aproximadamente 1 m y al día siguiente la diferencia. No se asienta todo el muro en un solo día porque el peso de las hiladas superiores podría deformar al mortero aún fresco y por tanto deformaría al muro (Fig. 4.8 y 4.9). Las juntas de construcción entre cada etapa de asentado deben tener un tratamiento especial para evitar fallas de cizalle, por ello se deben dejar libres las juntas verticales de la última hilada de la primera jornada, para poder colocar aquí el mortero al inicio de la segunda jornada de trabajo.

En todo momento del asentado de ladrillo se controló la verticalidad con la plomada y la horizontalidad con el cordel.



Figura 4.8 Asentado de la primera etapa de ladrillos



Figura 4.9 Asentado de la segunda etapa

4.5. Construcción de las columnas de confinamiento

Las columnas de confinamiento son ubicadas en los extremos de los muros y son fundamentales para que los muros soporten las fuerzas sísmicas. Las características de las columnas fueron las siguientes (Fig. 4.10):

- Se utilizó para las columnas de confinamiento un concreto de 20.59 MPa (210 Kg/cm²).
- Dimensiones:
Largo= 2.37 m
Ancho= 0.125 m
Peralte= 0.20 m

- El acero de refuerzo utilizado es el siguiente: $4\phi 1/2"$, $[] 1/4" 1 a 5,4@10, r@20$.

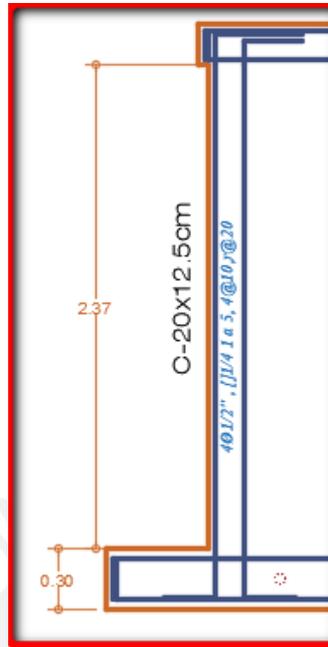


Figura 4.10. Refuerzo en columna de confinamiento

A medida que se iban asentando las últimas hiladas de ladrillo, se terminaban de colocar los estribos de las columnetas. Cuando se culminó el asentado, se verificó la verticalidad de los aceros de las columnetas y el espaciamiento de los estribos, cumpliendo lo requerido en el diseño.

Posteriormente se colocó el encofrado de las columnetas y se esperó hasta el día siguiente para poder vaciar (Fig. 4.11y 4.12).



Figura 4.11 Acero de columnetas y chicotes



Figura 4.12 Encofrado de columnetas

Durante el vaciado de las columnetas se extrajeron 3 probetas, la resistencia del concreto a los 28 días se muestra en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2 Resistencia de probetas de columnetas

Especimen	Diámetro		Carga Máxima (kN)	Área (cm ²)	σ (MPa)
	D1 (mm)	D2 (mm)			
Probeta 1	153.2	153.4	630.7	184.58	34.17
Probeta 2	152.7	153.2	653.8	183.73	35.58
Probeta 3	153.1	153.7	614.2	184.82	33.23
				Promedio	34.33

Las resistencias de las 3 probetas fueron superiores a 20.59 MPa (210 kg/cm²), la resistencia promedio obtenida fue aproximadamente de 34.33 MPa.

4.6. Construcción de la Viga solera

Las vigas soleras se diseñaron según lo indicado en la Norma E.070, estas se construyen sobre el muro que se requiere arriostrar y cumple la función de amarre. Las características de la viga solera (Fig. .4.13) son:

- Se utilizará para la viga solera un concreto de 20.59 MPa (210 kg/cm²).
- Dimensiones:
Largo= 2.87 m
Ancho= 0.125 m

Peralte= 0.20 m

- El acero de refuerzo utilizado es el siguiente: $4\phi 3/8''$, $[1/4'' 1 a 5, 4@10, r@20$.

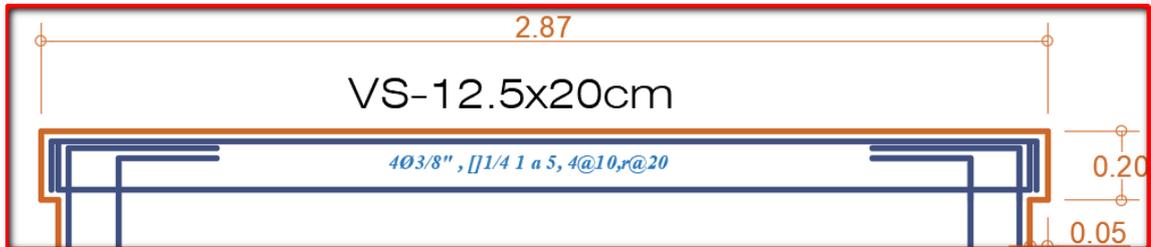


Figura 4.13. Acero en viga solera

Luego que se desencofraron las columnetas se procedió con el armado de la viga solera, se verificó que el refuerzo vertical de las columnetas penetre adecuadamente en la viga solera, para ello el refuerzo debió doblarse a la altura adecuada (Fig. 4.14). Luego, se procedió a colocar el encofrado de la viga para poder ser vaciada al día siguiente (Fig. 4.15). Durante el vaciado se extrajeron 2 probetas para ser ensayadas.



Figura 4.14. Colocación de Refuerzo en viga solera



Figura 4.15. Vaciado de viga solera



Figura 4.16. Ensayo de compresión de probetas

Las resistencias obtenidas de las probetas de viga solera (Fig. 4.16) que se obtuvieron fueron las indicadas en la Tabla 4.3:

Tabla 4.3 Resistencia de probetas de viga solera

Especímen	Diámetro		Carga Máxima (kN)	Área (cm ²)	σ (MPa)
	D1 (mm)	D2 (mm)			
Probeta 1	153.5	153.2	538.1	184.7	29.13
Probeta 2	154.7	153.3	525.7	186.27	28.22
				Promedio	28.68

Como en todos los casos, la resistencia a compresión obtenida fue mayor a 20.59 MPa (210 kg/cm²). En el caso de la viga solera, la resistencia promedio fue de 28.68 MPa.

Finalmente, al terminar la construcción del muro se procedió a izarlo hasta el interior del laboratorio, en espera de ser ensayado (Fig. 4.17).



Figura 4.17. Muro de albañilería terminado dentro del laboratorio

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS TEÓRICO DEL MURO A ESCALA NATURAL

5.1. Módulo de corte y elasticidad

El módulo de corte (G_m), se obtendrá a partir del ensayo de compresión axial de pilas y se representa mediante la siguiente fórmula para todo tipo de unidad de albañilería:

$$G_m = 0.4 E_m$$

Donde:

E_m = Módulo de elasticidad de las pilas (MPa), ver tabla 3.3

Los resultados se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1 Módulo de corte teórico

E_m	G_m
(MPa)	(MPa)
6.88E+03	2.75E+03

5.2. Rigidez lateral

Será necesario transformar las columnas de confinamiento en elementos equivalentes de albañilería, para poder calcular la rigidez lateral teórica K se consideró que el muro actúa en voladizo considerando efectos de flexión y corte, y se utilizará la siguiente expresión (San Bartolomé, 1998) :

$$K = \frac{E}{\frac{h^3}{3I} + \frac{fh(\frac{E}{G})}{A}}$$

Donde:

K = Rigidez lateral (mN/m)

E = Módulo de elasticidad experimental

h = Altura del muro, desde base hasta eje de carga (m)

I = Inercia de la sección transformada no agrietada

f = Factor de forma

G = Módulo de corte experimental

A = Área de la sección transversal del muro

Para poder generar la sección transformada, se debe determinar el valor de “ n ”, este se determina como el cociente entre el módulo de elasticidad del concreto y el módulo de elasticidad de la albañilería.

El módulo de elasticidad del concreto según la Norma E.060 se obtiene mediante la siguiente fórmula:

$$E_c = 15,000x\sqrt{f'c}$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia del concreto en las columnas de confinamiento 34.33 MPa (350 kgf/cm²)

El valor obtenido de E_c es de:

$$E_c = 15,000x\sqrt{350}$$

$$E_c = 27,519.7 \text{ MPa (2,806,243 ton/m}^2\text{)}$$

Se tiene la sección mostrada en la Fig. 5.1, compuesta por albañilería y por concreto armado:

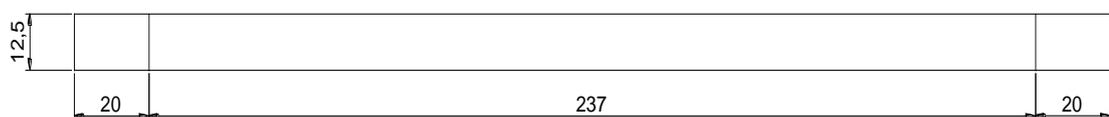


Figura 5.1. Sección de muro de albañilería construido en el laboratorio

En la tabla 5.2 se muestra el ancho de la columna transformada:

Tabla 5.2. Factor de Sección transformada

Ec (MPa)	Em (MPa)	n = Ec/Em	n*0.125 (m)
27,519.7	6,875.97		4.00

Luego de hallar el valor de “n”, se da la transformación de la sección y se obtiene la Fig. 5.2:

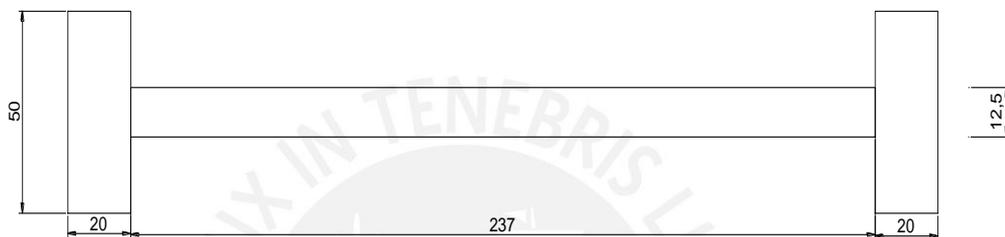


Figura 5.2. Sección transformada de muro de albañilería

Se halla el valor de la inercia de la sección transformada no agrietada:

$$I = \frac{0.125 \times 2.37^3}{12} + 2 \left(\frac{0.51 \times 0.20^3}{12} + 0.51 \times 0.20 \times 0.1285^2 \right)$$

$$I = 0.470 \text{ m}^4$$

El factor de forma se halla como el área de la sección transformada, entre el área del alma:

$$f = \frac{(0.51 \times 2 \times 0.20 + 2.37 \times 0.125) \text{ m}^2}{(2.77 \times 0.125) \text{ m}^2}$$

$$f = 1.445$$

La altura del muro h medida desde la base hasta el eje de carga es de 2.47 m, y por último el área de la sección transversal del muro (A) es de 0.500 m².

Los resultados de rigidez lateral se muestran en la tabla 5.3. Se utilizó una relación $E/G = 2.50$ y el valor del módulo de elasticidad se obtuvo del ensayo de compresión en pilas.

Tabla 5.3. Rigidez lateral teórica del muro

Inercia	f	A	h	E	K
(m4)	(m2/m2)	(m2)	(m)	(MPa)	(mN/m)
0.470	1.445	0.500	2.470	6,876	241.0

5.3. Fisuración en tracción por flexión

Para poder determinar la carga asociada a la primera fisura, se utilizará el criterio de la sección transformada no agrietada.

Para esto, el esfuerzo de tracción máximo al que estaba sometido el muro se igualará a la capacidad de tracción del concreto transformado a albañilería. Por ello, se plantea la siguiente ecuación:

$$\sigma_t = \frac{My}{I} = \frac{f't}{n} = \frac{2\sqrt{f'c}}{n}$$

Donde:

σ_t = Esfuerzo de tracción máximo

M = F (Carga asociada a la primera fisura) x h

I = Inercia de la sección transformada no agrietada

$f'c$ = Resistencia del concreto de elementos de confinamiento 34.33 MPa (350 kg/cm²)

$n = E_c/E_m$

y = 1.385 m (distancia de centroide al extremo traccionado)

Despejando el valor de la carga asociada a la primera fisura (F), se tiene que:

$$F = \frac{2\sqrt{f'c}I}{h y n}$$

Los resultados se muestran en la tabla 5.4:

Tabla 5.4. Fuerza asociada a la primera fisura de tracción por flexión

Inercia	h	n = Ec/Em	y	F
(cm ⁴)	(m)		(m)	(kN)
0.470	2.47	4.00	1.385	125.9

5.4. Agrietamiento diagonal teórico

La resistencia teórica al corte, asociada al primer agrietamiento diagonal se evaluará con la siguiente fórmula de la Norma E.070:

$$V_m = 0.35v'_m \alpha t L + 0.23P_g$$

Donde:

v'_m = Resistencia al corte de la albañilería obtenida de los ensayos

t = Espesor efectivo del muro

L = Longitud total de muro incluyendo peralte de columna de confinamiento

P_g = Carga axial = 0

α = Factor de esbeltez = L/h

h = 2.47m (altura de muro, desde base hasta eje de carga)

Los resultados se muestran en la tabla 5.5:

Tabla 5.5. Cálculo de carga de agrietamiento diagonal

v'_m	L	t	α	V _m
(MPa)	(m)	(m)		(kN)
0.985	2.770	0.125	1.121	133.8

5.5. Momento flector nominal máximo

Para muros de sección cuadrada, la capacidad resistente a flexión Mn se calculará con la siguiente fórmula:

$$Mn = As(fy)D$$

Donde:

Mn = Momento flector nominal máximo

As =Área del refuerzo vertical en el extremo del muro

D = Distancia entre los ejes de columnas

Luego de hallar el valor de Mn , la fuerza cortante asociada al momento nominal máximo es:

$$Vf = Mn/h$$

El área del refuerzo vertical en el extremo del muro se determina con el acero colocado:

$$As = 4\emptyset 1/2" = 4 \times 1.29 = 5.16 \text{ cm}^2$$

Los resultados se detallan en la tabla 5.6:

Tabla 5.6. Cálculo de momento nominal máximo

As (m ²)	fy (MPa)	D (m)	Mn (kN x m)
$0.001 = 5.16 \times 10^{-4}$	411.9	2.570	546.2

La fuerza cortante asociada a dicho momento se puede calcular de la siguiente manera:

$$Vf = \frac{Mn}{h}$$

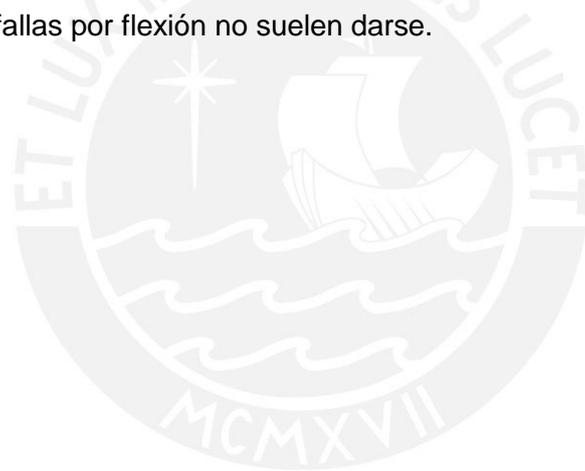
$$Vf = \frac{546.2}{2.470}$$

$$V_f = 221.1 \text{ kN}$$

El valor obtenido de carga, corresponde a la carga lateral que provoca la fluencia del refuerzo colocado en las columnas, y se incrementa si el acero entra en etapa de endurecimiento.

5.6. Tipo de falla

El tipo de falla se define teóricamente comparando las resistencias V_m y V_f . Cuando V_m es menor que V_f , el muro falla por corte con una grieta diagonal. Si los valores de ambas resistencias coinciden o son similares, no se podrá predecir el tipo de falla. En este caso, el valor obtenido para V_m fue de 133.8 kN, mientras que el valor obtenido para V_f fue de 221.1 kN, por ello se puede predecir que el muro a escala natural fallará por corte. Las fallas por corte son muy comunes en los edificios de albañilería, mientras que las fallas por flexión no suelen darse.



CAPÍTULO 6: ENSAYO CÍCLICO DE CARGA LATERAL

6.1. Descripción del ensayo

Con el objetivo de conocer el comportamiento sísmico de los muros confinados construidos con ladrillos sílico-calcareos KK 11H se realizó el ensayo de carga lateral cíclica con control de desplazamiento horizontal a un muro a escala natural.

Todos los equipos necesarios para el ensayo y el personal técnico capacitado fueron proporcionados por el Laboratorio de Estructuras de la PUCP.

Se colocaron al muro 8 LVDT, los cuales permitieron obtener la siguiente información:

- Diagrama de lazos histeréticos Fuerza cortante-Desplazamiento.
- Envolvente Fuerza cortante-Desplazamiento.
- Rigidez lateral.
- Carga de agrietamiento en tracción por flexión y por fuerza cortante.
- Capacidad de carga máxima.
- Distorsión angular asociada a la fractura y al límite de reparación.
- Módulo de corte.
- Degradación de resistencia.

Los desplazamientos se controlaron en 10 fases, estos fueron registrados con el LVDT D1, el cual fue colocado en forma horizontal en la parte intermedia y superior de la viga solera. Los desplazamientos asignados y el número de ciclos por fase se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Desplazamiento por cada fase del ensayo

Fase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D (mm)	1	2.5	5	7.5	10	12.5	15	20	25	Variable
NºCiclos	1	2	2	2	2	2	2	2	2	Armónico

Las grietas que se registraron en el muro por cada fase fueron marcadas con tizas de diferentes colores para poder diferenciarlas y cuando se originaron grietas importantes, el ensayo se detuvo con la intención de registrar el instante asociado así como para su medición.

Como se presentó en la tabla 6.1, en la fase 10 el muro fue sometido a un movimiento armónico de frecuencia 0.1 Hz y con desplazamiento variable, con la intención de observar con mayor notoriedad el comportamiento del muro y el tipo de falla predominante.

6.2. Montaje e instrumentación

El muro a escala natural se trasladó con la ayuda de un puente grúa al lugar de ensayos luego de cumplir los 28 días para poder equiparlo con toda la instrumentación necesaria para realizar el ensayo de carga lateral cíclica.

La cimentación del muro se niveló con un capping de yeso en la losa de ensayo y las gatas hidráulicas fijaron la cimentación con una fuerza horizontal y vertical de 20 ton.

El instrumento que ejerce la fuerza lateral al muro se denomina actuador dinámico y se coloca en el eje de la viga solera (Fig. 6.1). También se colocaron 8 LVDT que permitieron registrar los datos de desplazamientos en todo el ensayo (Fig. 6.2).



Figura 6.1. Actuador dinámico en muro



Figura 6.2. Colocación de los LVDT

Las funciones de los 8 sensores fueron:

D1: Permite controlar los desplazamientos laterales superiores del muro según lo indicado en cada fase, este sensor es muy importante ya que mediante los datos obtenidos por éste se puede calcular la rigidez del muro.

D2 y D3: Permitieron medir los posibles desplazamientos en la conexión columna-albañilería.

D4 y D5: Estos LVDT fueron colocados en los talones del muro para poder detectar desplazamientos verticales en los mismos y registrar las fisuras de tracción por flexión.

D6 y D7: Estos LVDT fueron colocados en las diagonales del muro para poder medir la deformación por fuerza cortante, estos LVDT son necesarios para calcular el módulo de corte del muro.

D8: Permitted to detect horizontal displacements in the lower part of the wall with respect to the concrete beam, with which it allows evaluating the interaction of both and detecting if sliding occurs at the base of the wall.

It should be indicated that before performing the test, it was verified that the LVDT sensors marked zero displacement as well as the load.

In figure 6.3 it can be appreciated the distribution of the 8 LVDT used for the test.

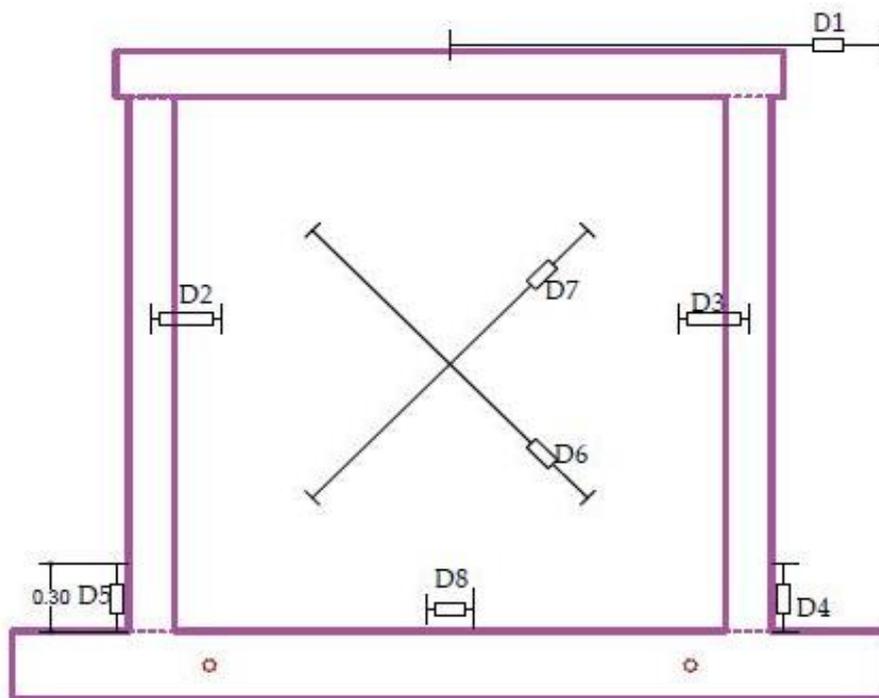


Figura 6.3. Distribución de los sensores en muro

6.3. Comportamiento del muro

The tested wall had a failure by shear, as first there were cracks of tension by flexion at the bases of the columns and then diagonal cracks and partial crushing of some masonry units.

When the harmonic test was performed, there was a greater crushing of the bricks, which had already been affected by the previous cracks.

Para poder entender el comportamiento del muro, en cada ciclo de ensayo se identificaron dos etapas, en la primera etapa se obtienen valores positivos de carga y de desplazamiento, mientras que en la segunda etapa se obtienen valores negativos tanto de carga como de desplazamiento.

A continuación, se detalla el comportamiento del muro para cada una de las fases que forman parte del ensayo de carga lateral cíclica.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 1 (D = 1 mm)



Figura 6.4. Fisuras en muro – Fase 1

No se presentaron fisuras, el comportamiento del muro fue elástico debido a que se aplicó un desplazamiento pequeño.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 2 (D = 2.5 mm)



Figura 6.5 Fisuras en muro – Fase 2

Se registraron ligeras fisuras de tracción por flexión en la parte inferior de las columnas, así como la aparición de fisuras verticales en el mortero y en ladrillos.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 3 (D = 5 mm)



Figura 6.6. Fisuras en muro – Fase 3

Las fisuras se extendieron en forma escalonada sobre la albañilería cruzando varias filas de ladrillos, generándose la primera grieta diagonal principal en la etapa empujando. La medida de la grieta más representativa en esta fase fue de 0.60 mm.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 4 (D = 7.5 mm)



Figura 6.7. Fisuras en muro – Fase 4

Se registraron ligeras fisuras en las unidades de albañilería superiores y aquellas fisuras registradas en la fase 3 se extendieron y aumentaron su tamaño. La mayor grieta registrada en la fase 3 de 0.60 mm pasó a medir 1.5 mm en esta fase, mientras que la grieta más representativa en la fase 4 fue de 0.75 mm.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 5 (D = 10 mm)

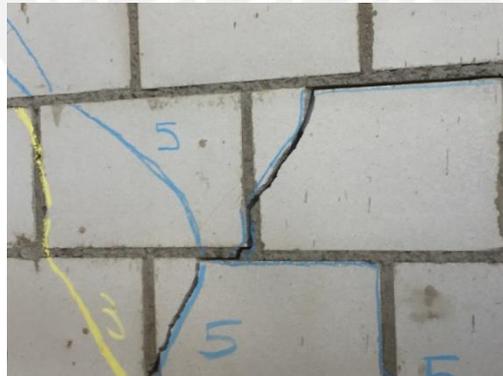


Figura 6.8. Fisuras en muro – Fase 5

En esta fase aparecieron nuevas grietas de tracción por flexión a lo largo de las columnas, así como se registraron nuevas grietas diagonales tanto en la parte inferior del muro como en la parte superior. La medida de la grieta más representativa en esta fase en la etapa empujando fue de 4 mm. El grosor de la grieta representativa registrada en las columnas fue de 0.2 mm, antes de esta fase, las fisuras en las columnas eran imperceptibles.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 6 (D = 12.5 mm)



Figura 6.9. Fisuras en muro – Fase 6

Se registran mayor cantidad de fisuras en el mortero generando la separación del mismo, se podía observar hacia el otro lado. La medida de la grieta más representativa en esta fase, la cual se generó en la fase 5, fue de 6.5 mm.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 7 (D = 15.00 mm)



Figura 6.10. Fisuras en muro – Fase 7

Se extendieron las fisuras en las unidades y sobre todo en el mortero tanto horizontal como verticalmente, se registró la aparición de pocas grietas nuevas propias de esta fase y la medida de la grieta más representativa fue de 8 mm.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 8 (D = 20.00 mm)



Figura 6.11. Fisuras en muro – Fase 8

Se registró una fisura marcada en la parte superior izquierda de la columna de confinamiento, la cual llegó hasta la viga solera, también se registraron nuevas fisuras en la parte inferior izquierda de la columna. La medida de la grieta más representativa fue de 1 cm.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – FASE 9 (D = 25.00 mm)



Figura 6.12. Fisuras en muro – Fase 9

En esta fase, se registraron nuevas grietas en la parte superior del muro, así como se registró el inicio de la trituración de un ladrillo en la parte superior. La medida de la grieta más representativa en la columna fue de 1 cm, la cual se inició en la fase 8.

ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA – ARMÓNICO



Figura 6.13. Fisuras en muro – Armónico

Cuando se aplicó la carga armónica, las fisuras fueron extendiéndose y abriéndose, se registró el desprendimiento parcial de caras de 7 unidades de albañilería (Parte posterior). Al aplicar la carga armónica al muro, se puede comprobar cuál sería el comportamiento del mismo frente a un sismo severo.

6.4. Revisión visual post ensayo del muro confinado

Cuando terminó el ensayo de carga lateral cíclica el muro fue trasladado al patio del Laboratorio de Estructuras de la PUCP, donde posteriormente se realizó el análisis post ensayo y se observó lo siguiente:

- No se presentó trituración en los talones ni fisuras de gran importancia; por ello no se procedió a picar los talones y se asumió que el acero de refuerzo no sufrió pandeo.

- En la parte superior izquierda del muro, se presentó una fisura marcada en la columna de confinamiento, así como también se presentó ligero desprendimiento de concreto (Fig.6.14).



Figura 6.14. Fisura marcada en columna de confinamiento

- En varias hiladas del muro se pueden observar fisuras muy marcadas, así como también se observa trituración y desprendimiento del mortero tanto horizontal como vertical.
En el caso de las unidades de albañilería, se observan algunas trituraciones parciales, sin llegar a la trituración ni al desprendimiento total de la unidad (Fig. 6.15).



Figura 6.15. Fisuras en muro y trituración parcial de unidades

- En la cara posterior del muro si se puede observar desprendimiento y trituración de unidades de albañilería, 7 unidades de albañilería son las más afectadas. También se muestran fisuras marcadas tanto en las unidades de albañilería como en las columnas de confinamiento (Fig. 6.16).



Figura 6.16. Trituración y desprendimiento de unidades en cara posterior de muro

CAPÍTULO 7: GRÁFICOS DE RESULTADOS

7.1. Diagrama de lazos histeréticos

En la figura 7.1 se aprecian los lazos histeréticos correspondientes al muro ensayado. Estos se obtuvieron al graficar los valores obtenidos Carga Vs Desplazamiento de las fases 1 a 9 consideradas en el ensayo de carga lateral cíclica, es decir no se graficó la fase 10, ya que para esa fase se consideró un movimiento armónico.

Se puede observar que los lazos son finos y pasan por el origen del sistema de referencia, lo cual es usual en sistemas que disipan poca energía y degradan rigidez lateral. También se aprecia que en la fase 4 se llega a obtener la máxima resistencia y de aquí en adelante se da una degradación importante de la misma.

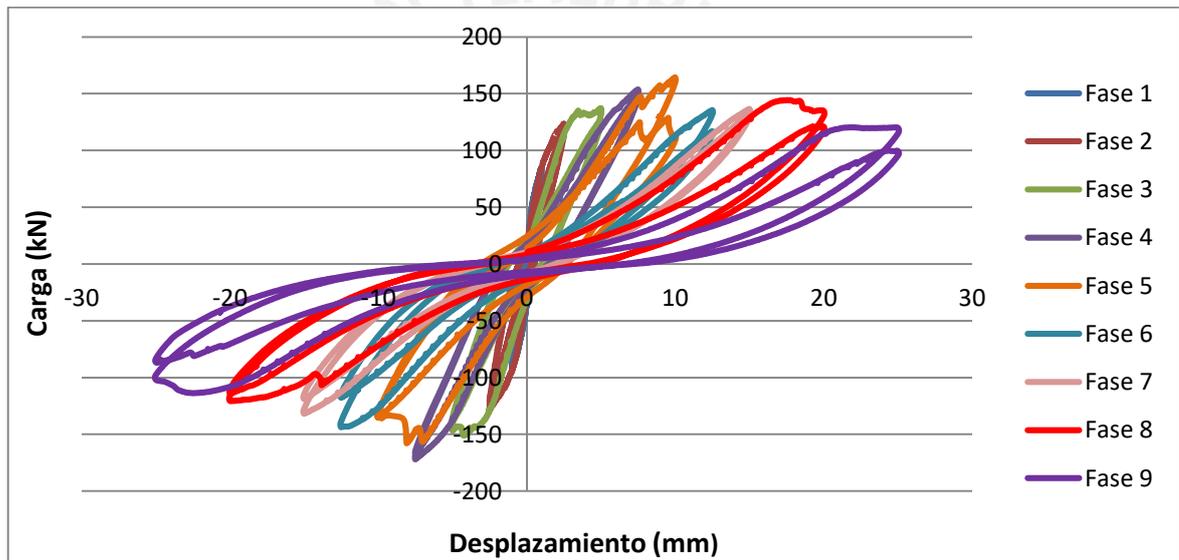


Figura 7.1. Lazos histeréticos del muro sílico-calcáreo

7.2. Envoltente del diagrama de lazos histeréticos

Para la elaboración de la envolvente fuerza-desplazamiento, se emplearon los valores máximos obtenidos en el primer ciclo de cada fase considerada.

Como se mencionó en el capítulo anterior, se registraron dos etapas por fase, una etapa empujando (carga y desplazamiento positivos) y una etapa jalando (carga y desplazamiento negativos). Por ello, en la tabla 7.1 se puede observar que los valores máximos obtenidos en el primer ciclo para cada fase son de signos contrarios.

A continuación, se presenta la tabla 7.1 la cual muestra las fuerzas y desplazamientos máximos por cada fase de los 8 LVDT colocados en el muro.

Tabla 7.1 Valores de fuerza y desplazamiento del muro

	Fuerza (kN)	Sensor D1	Sensor D2	Sensor D3	Sensor D4	Sensor D5	Sensor D6	Sensor D7	Sensor D8
Fase 1	84.7241	1.0035	0.0023	0.0033	-0.2854	0.1112	-0.0057	0.0398	0.0004
	-92.8956	-0.9991	0.0028	0.0006	0.1165	-0.3169	-0.0018	0.0405	0.0005
Fase 2	123.4466	2.5000	0.0013	0.0020	-0.6600	0.1928	-0.2523	0.0468	0.0002
	-128.1646	-2.5018	0.0001	-0.0056	0.2372	-0.6454	0.0324	-0.0104	-0.0005
Fase 3	137.2489	4.9882	0.0033	-0.0023	-0.8686	0.3059	-1.8432	0.2097	0.0009
	-151.0398	-4.2761	-0.0881	-0.0115	0.3390	-0.8977	0.0305	-0.4354	-0.0009
Fase 4	153.7367	7.4897	-0.0359	0.0030	-1.0973	0.5205	-4.5645	0.3815	-0.0007
	-172.0708	-7.5167	-0.1221	-0.0048	0.4512	-1.0722	0.2317	-3.3327	0.0002
Fase 5	164.3152	9.9971	-0.0253	0.0008	-1.2605	0.8655	-7.2866	1.5846	0.0283
	-157.9586	-8.0967	-0.0807	-0.0103	0.5214	-0.8788	0.8447	-5.0994	0.0099
Fase 6	135.5617	12.4744	-0.0300	-0.0016	-1.1251	0.9551	-11.2033	3.6723	0.0572
	-143.7826	-12.5164	-0.0304	-0.0017	0.7875	-0.6736	1.6731	-9.0250	0.0252
Fase 7	136.5970	14.9714	-0.0213	-0.0028	-1.1822	0.9924	-12.6340	4.6130	0.1000
	-131.8876	-15.0097	-0.0214	-0.0033	0.8817	-0.6358	3.3856	-10.8886	0.0503
Fase 8	144.3140	17.5664	-0.0038	-0.0048	-1.2891	1.0415	-14.7191	5.3352	0.1083
	-120.7095	-19.9324	-0.0232	-0.0262	1.1568	-0.6380	6.2702	-15.8125	0.0498
Fase 9	120.2989	24.9103	-0.0158	-0.0078	-1.2083	1.2475	-20.2065	5.6246	0.1255
	-113.7496	-22.5058	-0.0355	-0.1422	1.3276	-0.6321	7.1319	-19.3651	0.0658
Fase 10	ARMÓNICO								

En la figura 7.2 se muestra la envolvente fuerza-desplazamiento horizontal D1.

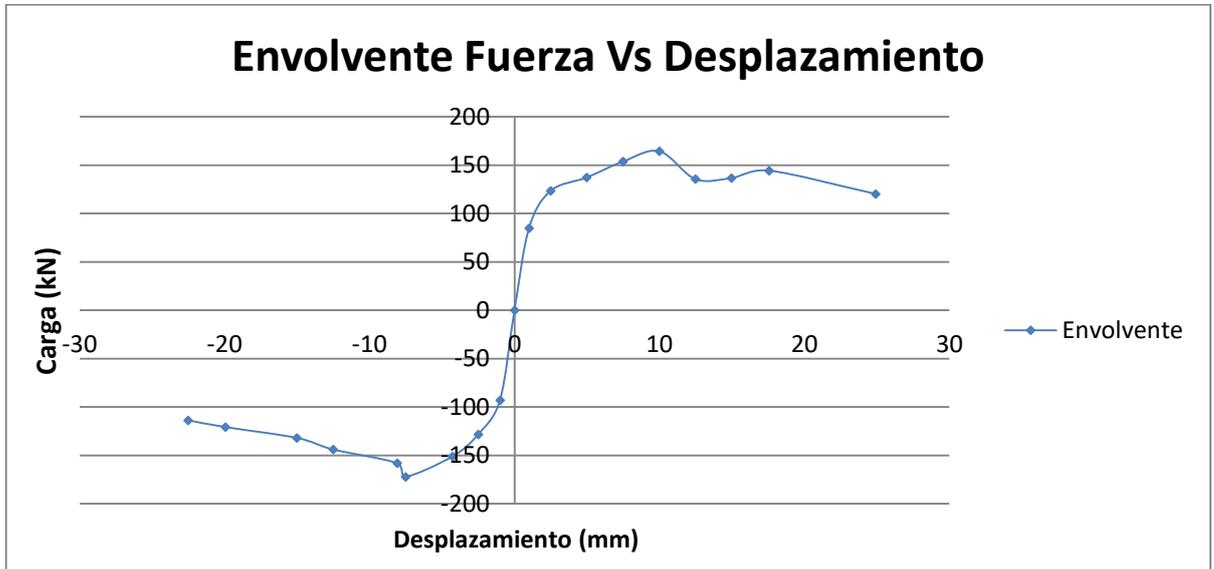


Figura 7.2. Envolvente fuerza-desplazamiento horizontal D1

Para tener una mejor idea del comportamiento del muro y por efectos comparativos, se consideró el valor promedio absoluto del desplazamiento D1 y de la fuerza cortante (Figura 7.3).

En la figura 7.3 adicionalmente se ha considerado una vertical ubicada en el desplazamiento 12.5 mm el cual corresponde a una deriva de 0.005, valor máximo de deriva permitido por la Norma E.030.

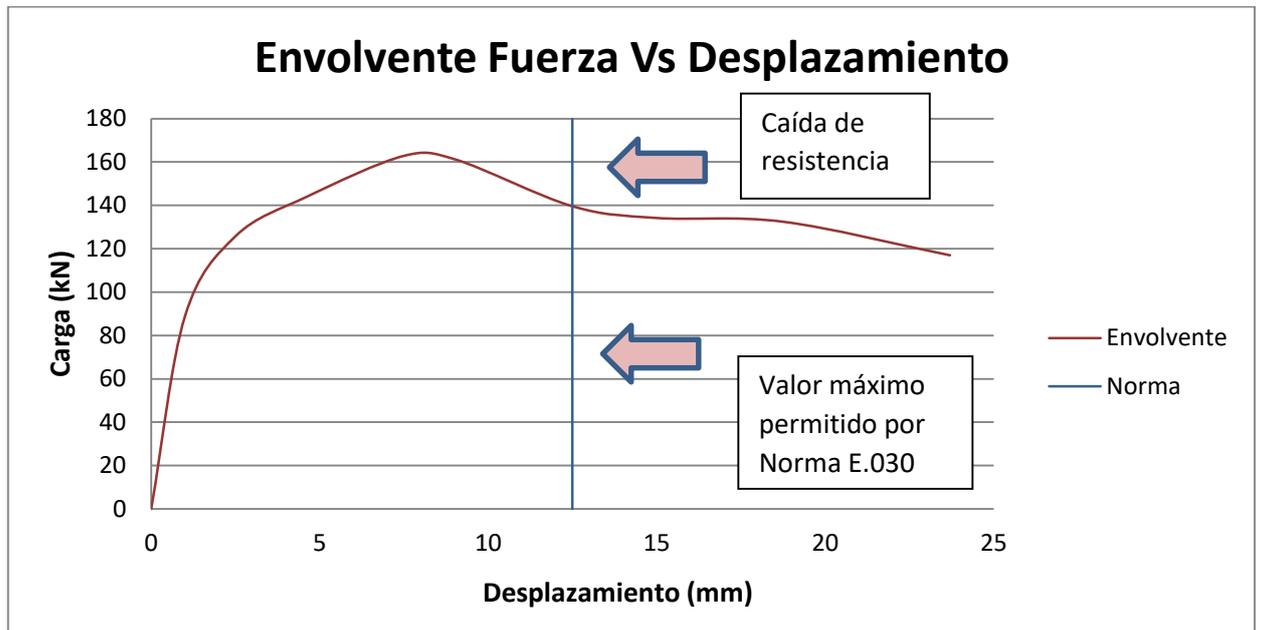


Figura 7.3. Envlovente Fuerza-desplazamiento con valores promedios absolutos

En la gráfica se puede observar que el muro llega a su máxima resistencia para un desplazamiento de 7.5 mm (Fase 4) y partir de esta fase en adelante se observa una degradación de resistencia, es por ello que se determinará la caída de resistencia con respecto a la intersección de la envlovente del muro y el valor máximo permitido por la Norma E.030. La disminución de resistencia fue de 14%, el cual es un valor aceptable, ya que se suele aceptar hasta una degradación de resistencia del 25 % (Ref.3) y por ende se puede mencionar que el comportamiento del muro es adecuado.

CAPÍTULO 8: COMPARACIÓN DE RESULTADOS

8.1. Rigidez lateral elástica

Para poder determinar la rigidez lateral se utilizó la primera fase de la gráfica Fuerza Vs Desplazamiento, en la cual el comportamiento del muro fue elástico.

La rigidez lateral (K) se determina como la pendiente en un tramo del lazo histerético que representa el comportamiento elástico del muro:

$$K = \frac{\Delta \text{Fuerza}}{\Delta \text{Desplazamiento}}$$

En la figura 8.1 y la tabla 8.1 se muestran los resultados para el muro ensayado.

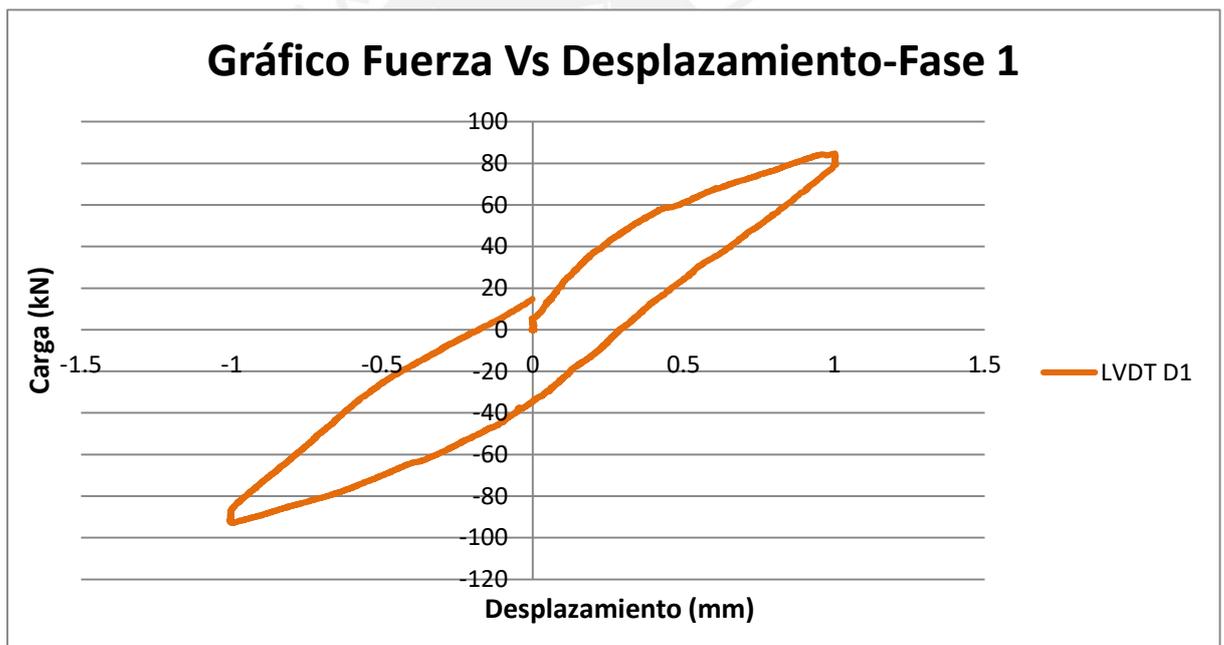


Figura 8.1 Lazo histerético de la fase 1

Tabla 8.1 Cálculo de la rigidez lateral

	D (mm)	F (kN)
Punto 1	0.027	8.167
Punto 2	0.072	17.82
Δ	0.045	9.655
K (mN/m) real	212.7	
K (mN/m) teórico	241.0	
Error (%)	13%	

Como se observa en la tabla anterior, el valor de rigidez lateral experimental fue de 212.7 mN/m, mientras que el resultado teórico fue 13% mayor (241.0 mN/m).

8.2. Cálculo del módulo de corte de la albañilería

Para poder calcular el módulo de corte de la albañilería, se emplean las gráficas Fuerza Vs Desplazamiento de los LVDT D6 y D7, los cuales fueron colocados en las diagonales del muro. Las gráficas se elaboran con los resultados obtenidos del ensayo cíclico lateral en la primera fase del muro, en la cual el muro tiene un comportamiento elástico.

El módulo de corte (G_m) es la pendiente de la gráfica y se calcula con la siguiente fórmula:

$$G_m = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma}$$

Donde:

$\Delta\tau$ = Variación de esfuerzo, $(F_2-F_1)/\text{área de corte}$

$\Delta\gamma = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$

Al analizar los desplazamientos máximos obtenidos por los LVDT D6 y D7, los cuales fueron -0.015 mm y 0.050 mm se decidió por no determinar el módulo de corte por medio de la gráfica Fuerza Vs Desplazamiento; ya que al obtener valores menores a 0.1 mm, grado de precisión del LVDT, se pueden obtener resultados erróneos.

8.3. Rotura diagonal

Las primeras fisuras diagonales en el muro aparecieron durante la fase 3, estas empezaron desde las esquinas superiores y se extendieron pasando el centro del muro, en el caso del valor de V_m teórico este fue determinado anteriormente.

La fuerza y el desplazamiento horizontal asociados a la rotura diagonal se observan en la tabla 8.2.

Tabla 8.2. Rotura diagonal del muro ensayado

V_m experimental (kN)	Desplazamiento (mm)	V_m teórico (kN)	Error
137.2	4.99	133.8	-3%

Como se puede observar en la tabla 8.2, el valor de V_m experimental obtenido 137.2 kN es muy similar al V_m teórico calculado de 133.8 kN.

8.4. Distorsión angular

La Norma E.030 de Diseño Sismorresistente señala valores máximos para los desplazamientos relativos de entrepiso, estos valores dependen del material empleado y se muestran en la tabla 8.3.

Tabla 8.3. Límites para desplazamientos laterales de entrepiso (Norma E.030, 2016)

Material predominante	(D_i/hei)
Concreto Armado	0.0070
Acero	0.0100
Albañilería	0.0050
Madera	0.0100

El muro sílico-calcáreo King Kong 11H clasifica como un muro de albañilería confinada, por ello el valor máximo de distorsión angular es 0.005.

La altura del muro desde su base hasta el eje del actuador es 2,470 mm, por lo tanto el máximo desplazamiento lateral inelástico admisible sería: $2,470 \times 0.005 = 12.35$ mm, aproximadamente 12.5 mm. Este desplazamiento lateral corresponde a la fase 6 del ensayo.

8.5. Fisuración de tracción por flexión

Las primeras grietas de tracción por flexión aparecieron en el primer ciclo de la fase 2.

En la tabla 8.4 se puede observar la fuerza experimental obtenida a través del ensayo cíclico lateral y la fuerza teórica obtenida mediante fórmula anteriormente. La diferencia entre ambos valores es mínima y cabe recalcar que al momento de hallar la fuerza teórica se empleó el valor de $f'c$ obtenido mediante el ensayo de probetas de las columnas, el cual dio un valor de 34.33 MPa (350 kg/cm²), resultado mucho mayor al de diseño que fue de 20.59 MPa (210 kg/cm²).

Tabla 8.4 Fuerza de agrietamiento de tracción por flexión

Fuerza experimental (kN)	Fuerza teórica (kN)	Error
123.4	125.9	2%

8.6. Comportamiento del refuerzo vertical

La fuerza cortante que logra la fluencia del refuerzo colocado en las columnas de confinamiento fue determinada teóricamente, este valor es $V_f=221.1$ kN.

El valor máximo de fuerza horizontal alcanzado por el muro fue de 172.1 kN, esto quiere decir que el refuerzo no entró en la etapa de endurecimiento.

Adicionalmente, los LVDT D4 y D5, que fueron colocados en los talones del muro, registraron los desplazamientos con los que se calculó la deformación unitaria vertical.

$$\epsilon = \frac{D}{L}$$

Donde:

ϵ = deformación unitaria

D = valor promedio absoluto del máximo desplazamiento del LVDT D4 y D5

L = distancia entre las bases de los sensores

En la Fig. 8.2 se muestran los gráficos para los sensores D4 y D5.

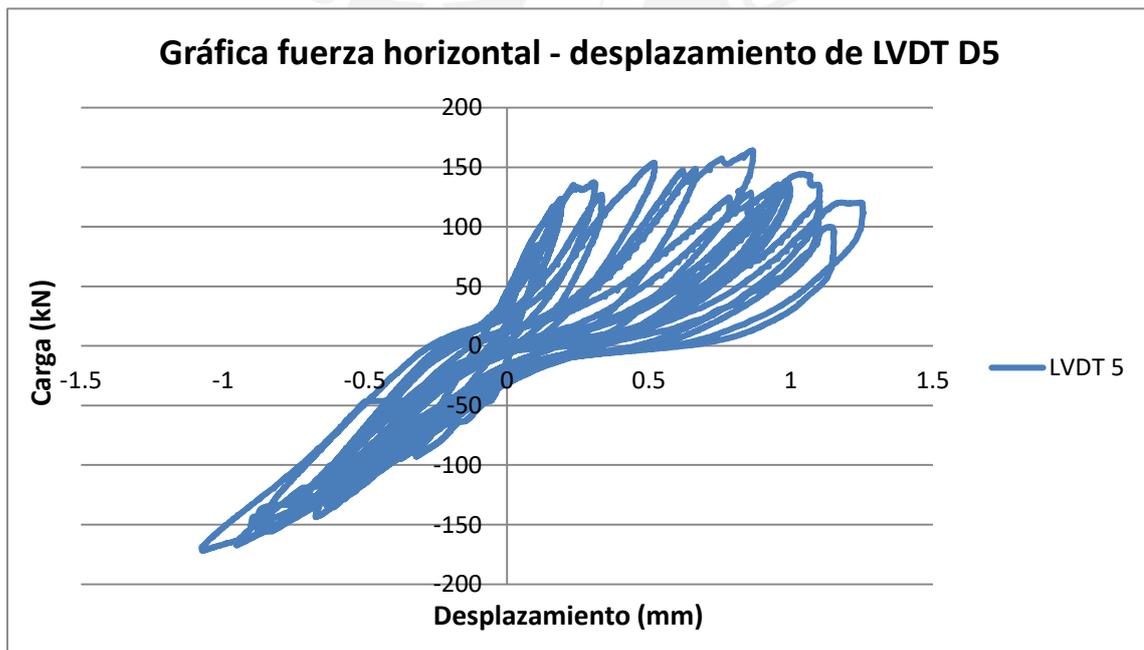
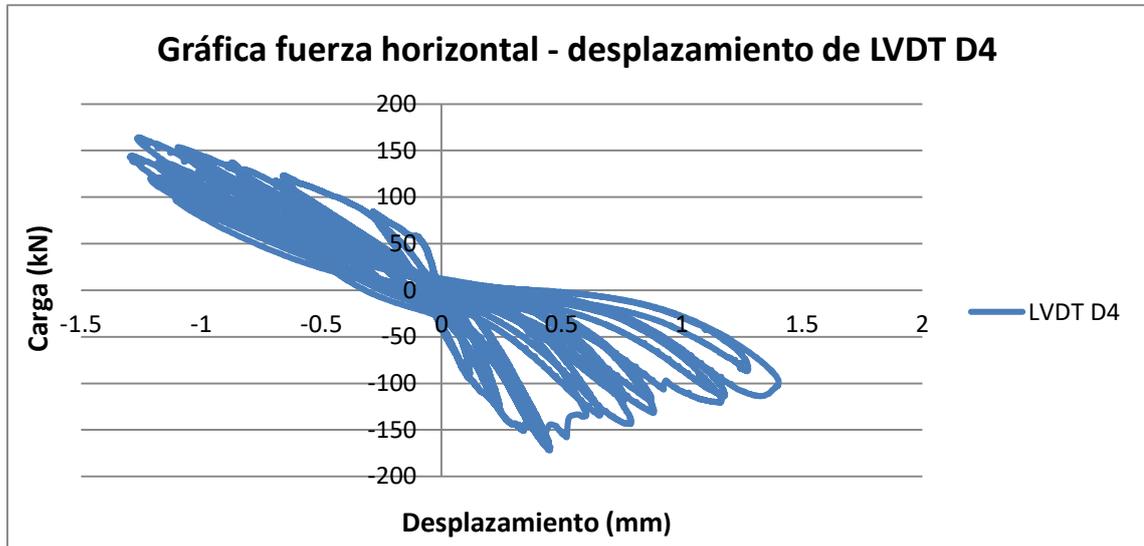


Figura 8.2. Gráficos de fuerza horizontal – desplazamiento de los sensores D4 y D5

Se tienen los siguientes valores:

$$D = 1.33 \text{ mm}$$

$$L = 300 \text{ mm}$$

$\varepsilon = 0.0044, 0.0035$

La deformación unitaria $\varepsilon = 0.0044$ fue mayor a la deformación unitaria del acero en fluencia ($f_y/E_s = 4,200/2,100,000 = 0.002$) con lo cual se demuestra que el acero longitudinal de las columnas entró en fluencia e incursionó en la etapa de endurecimiento.

Se entra en una contradicción, ya que; comparando los valores de fuerzas se obtiene que el refuerzo no entró en la etapa de endurecimiento, mientras que al comparar las deformaciones unitarias se determina que sí se alcanzó la fluencia. Si el acero hubiera entrado en la etapa de endurecimiento, se mostrarían cambios a simple vista en el muro, por ejemplo; se debería presentar desprendimiento de concreto en los talones, ya que la deformación máxima del concreto es 0.0035; por ende, se deduce que el acero no incursiona en la etapa de endurecimiento.

8.7. Carga máxima soportada

La resistencia máxima experimental se obtuvo al promediar los valores máximos de las ramas (positiva y negativa) del primer ciclo de cada fase (Fig. 7.3). La máxima carga se presentó durante la fase 4 del ensayo y el resultado se presenta en la tabla 8.5.

Tabla 8.5 Máxima carga soportada

Fuerza máxima	Desplazamiento
(kN)	(mm)
162.9	7.5

8.8. Degradación de la rigidez

Para poder graficar la degradación de la rigidez lateral (K) a lo largo del incremento del desplazamiento horizontal, fue necesario analizar la gráfica Fuerza vs Desplazamiento del sensor D1. Ver figura 8.1.



Figura 8.3 Gráfica de degradación de rigidez vs desplazamiento por fase

La rigidez lateral se calculó como la pendiente del lazo histerético perteneciente al ciclo 1 de cada fase. La degradación de la rigidez por fase se muestra en la tabla 8.6.

Tabla 8.6. Degradación de rigidez por fase

Fases	Desplazamiento	K	Degradación
		mN/m	%
Fase 1	D= 1mm	180.55	100%
Fase 2	D=2.5 mm	155.06	86%
Fase 3	D=5 mm	103.02	57%
Fase 4	D=7.5 mm	69.04	38%
Fase 5	D=10 mm	36.49	20%
Fase 6	D=12.5 mm	28.75	16%
Fase 7	D=15 mm	14.26	8%
Fase 8	D= 20 mm	10.52	6%
Fase 9	D=25 mm	8.24	5%

CAPÍTULO 9: CONCLUSIONES Y LÍNEA FUTURA DE INVESTIGACIÓN

9.1. Conclusiones

Las conclusiones que se presentarán a continuación son limitadas debido a la poca cantidad de especímenes ensayados, pero son válidas para materiales semejantes a los estudiados en este proyecto. Es importante recalcar que los resultados obtenidos fueron los esperados, el comportamiento estructural del muro confinado ante la carga horizontal (tipo sismo), se puede considerar satisfactorio. Aunque solo se ensayó un muro, los resultados obtenidos indican que este tipo de ladrillo puede aceptarse y usarse como una buena alternativa a los ladrillos de arcilla sólida. Además, los ladrillos huecos de arcilla que comúnmente se usan de manera inadecuada en los muros estructurales podrían reemplazarse por ladrillos 11H.

9.1.1. Unidades de albañilería

- Según la referencia 15, nos indica que para la construcción de muros portantes solo se puede emplear ladrillos sólidos, asimismo los ladrillos sólidos industriales pueden ser empleados para edificaciones de más de 4 pisos en todas las zonas sísmicas. El ladrillo King Kong 11 H debido a su poca variación dimensional, su nulo alabeo y su resistencia característica, clasificó como clase IV, apto para la construcción de muros portantes por ser unidades macizas, y al ser un ladrillo industrial, podrá ser empleado en cualquier tipo de zona sísmica y en viviendas de hasta 5 pisos.
- Todos los ensayos realizados a esta unidad de albañilería, cumplieron con lo indicado en la Norma E.070 y a la vez todos los resultados se encontraron en el rango especificado por el fabricante.
- El valor de resistencia obtenida para el mortero fue de 14.14 MPa, siendo muy similar a la resistencia de la unidad que fue de 12.98 MPa, siempre se espera que las resistencias sean similares, para garantizar la homogeneidad de la albañilería.

9.1.2. Prismas y muretes de albañilería

- Las 3 pilas ensayadas presentaron valores de esbeltez de 5.32, este valor afectó la resistencia característica e influyó en la forma de falla de las pilas. Las

fallas se dieron por tracción debido a la expansión lateral causada por la compresión aplicada y por el efecto de pandeo, lo cual generó desprendimiento completo de las unidades y desprendimiento de sus caras hasta el colapso total de las pilas.

- El módulo de elasticidad experimental se pudo predecir con las fórmulas de la Ref. 15: $E_m = 600 f'_m$ y al comparar este valor con el obtenido experimentalmente se obtuvo un 1% de error.
- En el caso de los muretes, para fines de diseño la resistencia al corte puro v'_m no debe exceder el valor de $\sqrt{f'_m}$, por ende este valor se encuentra limitado. Sin embargo, en el caso de esta investigación se cumple lo mencionado anteriormente, por ende, el valor de v'_m se mantiene tal cual lo obtenido.
- Tanto las pilas como los muretes mostraron un buen comportamiento estructural, en relación con los valores obtenidos de compresión axial f'_m y la resistencia al corte v'_m .

9.1.3. Construcción del muro

- La conexión al ras empleada mejoró la conexión columna-albañilería evitándose problemas de cangrejas en las columnas. Asimismo, los chicotes utilizados cada dos hiladas permitieron que el desplazamiento en la conexión columna-albañilería sea mínima.
- El concreto utilizado en todos los elementos, viga solera, columnetas y viga de cimentación superó la resistencia especificada de 20.59 MPa (210 kg/cm²). En el caso de la viga de cimentación se obtuvo una resistencia promedio de 36.58 MPa kg/cm², en las columnetas se obtuvo una resistencia promedio de 34.33 MPa y finalmente en la viga solera se obtuvo una resistencia promedio de 28.68 MPa.

9.1.4. Rigidez lateral

- Aplicando el criterio de sección transformada (Ref. 15), la rigidez lateral del muro de albañilería confinada obtenida fue de 241.0 mN/m, mientras que el valor obtenido de la rigidez experimentalmente empleando la primera fase de la gráfica Fuerza Vs Desplazamiento fue de 212.7 mN/m; es decir la rigidez pudo predecirse de manera teórica con un error del 13%.

9.1.5. Resistencia a tracción por flexión

- Utilizando el criterio de sección transformada (Ref.15), la fuerza obtenida asociada a la primera fisura fue de 125.9 kN, la fórmula empleada al hallar este valor admite que la resistencia a tracción por flexión del concreto en las columnas se puede expresar por $f't = 2\sqrt{f'c}$. El valor obtenido experimentalmente fue de 123.4 kN, entonces este valor se pudo predecir teóricamente con un error del 2%.

9.1.6. Carga de agrietamiento diagonal

- Utilizando la Norma E.070 se pudo determinar la resistencia teórica al corte, asociada al primer agrietamiento diagonal, con un error del 3%. Con la fórmula de la norma E.070 para V_m en unidades sílico calcáreas: $V_m = 0.35v'matL + 0.23Pg$, se obtuvo 133.8 kN, mientras que el valor obtenido experimentalmente fue de 137.2 kN.

9.1.7. Carga máxima

- La carga máxima soportada por el muro fue de 162.9 kN, este valor indicó que el acero de refuerzo de las columnas no ingresó en la etapa de endurecimiento; sin embargo, se entra en contradicción ya que al comparar las deformaciones unitarias se determina que sí se alcanzó la fluencia. Si el acero hubiera entrado en la etapa de endurecimiento, se mostrarían cambios a simple vista en el muro, por ejemplo; se debería presentar desprendimiento de concreto en los talones, ya que la deformación máxima del concreto es 0.0035; por ende, se llega a concluir que el acero no incursiona en la etapa de endurecimiento.

9.1.8. Tipo de falla

- Con los valores obtenidos de la resistencia teórica al corte relacionado al primer agrietamiento diagonal y la resistencia relacionada a la fuerza cortante que inicia la fluencia del acero, se pudo predecir que el muro iba a fallar por corte con grietas diagonales. El valor obtenido para V_m fue de 133.8 kN, mientras que el valor obtenido para V_f fue de 221.1 kN, es decir $V_f > V_m$. Esto fue demostrado experimentalmente, ya que primero se formaron fisuras

de tracción por flexión en las bases de las columnas y luego surgieron grietas diagonales y trituración de algunas unidades de albañilería. Por ende, se comprueba que el muro falló por corte tal cual se predijo.

9.1.9. Comportamiento del muro

- Las fisuras que aparecieron en el muro a escala natural siguieron el mismo patrón que presentaron los muretes; es decir se presentaron fisuras diagonales que cortaron tanto al ladrillo como al mortero, aunque también se presentaron algunas fisuras escalonadas en el muro.
- Los lazos histeréticos del muro son finos y pasan por el origen del sistema de referencia, lo cual es usual en sistemas que disipan poca energía y degradan rigidez lateral. En la fase 4 se llega a obtener la máxima resistencia del muro y de aquí en adelante se da una degradación gradual de la misma, el máximo desplazamiento registrado en todo el ensayo fue de 23.71 mm. Se determinó la caída de resistencia con respecto a la intersección de la envolvente del muro y el valor máximo permitido por la Norma E.030 para muros de albañilería. La caída obtenida de resistencia fue de 14%, el cual es un valor aceptable, ya que se suele aceptar hasta una degradación de resistencia del 25 % (Ref.3) y por ende se puede mencionar que el comportamiento del muro ante cargas laterales tipo sismo fue adecuado.

El muro ensayado no presentó una resistencia muy alta en comparación a otros muros, hechos con otros tipos de ladrillos; como en el caso de la tesis de la Ingeniera Paola Angles, mencionada en el Estado del Arte del presente estudio, en la cual se obtuvo como resistencia máxima en el muro de ladrillos de arcilla 222 kN, mientras que la resistencia máxima obtenida en el muro de ladrillos de concreto fue de 220 kN. El muro sílico calcáreo tuvo una resistencia máxima de 162.9 kN; sin embargo, tuvo una buena capacidad de deformación, sin mayor deterioro de las unidades de albañilería.

9.2. Línea futura de investigación

El muro de albañilería confinada sílico calcárea King Kong 11H luego de haber sido sometido a carga armónica no presentó mayores daños, ni en las unidades de albañilería, ni en los elementos de confinamiento (vigas y columnas). No se presentó desprendimiento de concreto, ni el acero de refuerzo quedó expuesto, solo se presentaron fisuras marcadas y trituración parcial de unidades de albañilería.

Por lo mencionado anteriormente surge el interés de investigar en un futuro las siguientes situaciones:

-Reforzar y reparar el muro ya ensayado, para posteriormente volver a realizar el ensayo de carga lateral cíclica y poder realizar una comparación de los resultados obtenidos en ambos muros, el muro de albañilería confiada King Kong 11H sin refuerzo y el nuevo muro reparado y reforzado.

-También cabe repetir el ensayo de carga lateral en un muro de ladrillos King Kong 11H con columnas y vigas de confinamiento donde se tenga un concreto de resistencias $f'c$ cercanas a 175 kgf/cm^2 , a fin de poder comparar los resultados con los obtenidos considerando que la resistencia en este trabajo de tesis fue de 20.59 MPa (210 kgf/cm^2).

-Repetir el ensayo de carga lateral en el muro de ladrillos King Kong 11H y añadir carga vertical fija que simule la carga existente en un muro del primer piso para un edificio de 3 o 4 pisos, a fin de poder predecir el comportamiento sísmico y determinar la factibilidad del empleo de ladrillos King Kong 11H en estructuras mayores.

REFERENCIAS

1. Bolaños H., Moreno M. (2007): "Ensayo de carga lateral cíclica en muros portantes placa P-14". Tesis para optar el Título de Licenciado en Ingeniería Civil. PUCP.
2. Compañía Minera Luren (2015). Especificaciones técnicas Ladrillo Sílico Calcáreo King Kong 11H. <http://www.mineraluren.com/>
3. Gallegos, Héctor y Carlos Casabonne (2005): "Albañilería Estructural". Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
4. Instituto Nacional De Defensa Civil (2007) "Movimiento Sísmico afecta severamente Departamentos de Ica y Sur de Lima", Informe de emergencia N°322, 16/09/2007, Instituto Nacional de Defensa Civil, Lima, Perú.
5. Pastorutti A. (1985). "Ensayo de carga lateral en muros de albañilería confinados – efectos del refuerzo". Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.
6. San Bartolomé, A (1998). "Análisis de Edificios". Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
7. San Bartolomé, D. Quiun. (2007) "Nuevas metas para mejorar la Norma de Albañilería E.070-2006". XVI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú, Arequipa.
8. San Bartolomé, A (2007). Blog de investigaciones en albañilería <http://blog.pucp.edu.pe/albanileria>. Contiene los artículos 4, 5 y 6, y los comentarios a la Norma E.070.
9. San Bartolomé A, Quiun D (2008): "Seismic behaviour of masonry constructions in 2007 Pisco, Peru earthquake". 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, on CD-ROM.
10. San Bartolomé A, Quiun D, Araoz T, Velezmoro J (2013): "Seismic Reinforcement of Existing Walls made of Horizontally-Hollow Bricks". 12th Canadian Masonry Symposium, Vancouver, British Columbia, on USB.

11. San Bartolomé A, Quiun D, Barr K, Pineda C (2011): "Seismic Reinforcement of Confined Masonry Walls made with Hollow Bricks using Wire Meshes". 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisboa, Portugal, on CD-ROM.
12. San Bartolomé, A., Quiun, D. y Silva, W (2011). Diseño y construcción de estructuras sismorresistentes de albañilería. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
13. San Bartolomé, A (1994): "Construcciones de Albañilería" –Comportamiento Sísmico y Diseño Estructural. Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
14. San Bartolomé, A., Angles P. (2008): "Comparación del comportamiento a carga lateral cíclica de un muro confinado con ladrillos de concreto y otro con ladrillos de arcilla". Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. PUCP.
15. San Bartolomé, A., Paredes J., Caycho D. (2009): "Control de la trituración de los ladrillos huecos en muros de albañilería confinada sujetos a carga lateral cíclica". Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. PUCP.
16. SENCICO. (2006). Norma Técnica de Edificación E.070. Albañilería. Lima, Perú.
17. SENCICO. (2016). Norma Técnica de Edificación E.030. Diseño Sismorresistente. Lima, Perú.
18. SENCICO. (2009). Norma Técnica de Edificación E.060. Concreto Armado. Lima, Perú.